



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**INCÊNDIOS FLORESTAIS NO BIOMA PANTANAL:
DINÂMICA ESPACIAL E TEMPORAL ENTRE 2003 E 2013**

NICKOLAS MENDES DE MATOS

**ORIENTADOR: PROF. DR. ERALDO APARECIDO TRONDOLI
MATRICARDI**

BRASÍLIA-DF DEZEMBRO 2014

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**INCÊNDIOS FLORESTAIS NO BIOMA PANTANAL:
DINÂMICA ESPACIAL E TEMPORAL ENTRE 2003 E 2013**

Estudante: Nickolas Mendes de Matos, matrícula 09/0127358

RG: 2759343 SSP/DF

CPF: 029.518.371-35

Linha de pesquisa: Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto

Orientador: Prof. Dr. Eraldo Aparecido Trondoli Matricardi

Projeto de pesquisa apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília, como parte das exigências para obtenção do título de Engenheiro Florestal.

Brasília – DF, 04 de dezembro de 2014.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**INCÊNDIOS FLORESTAIS NO BIOMA PANTANAL:
DINÂMICA ESPACIAL E TEMPORAL ENTRE 2003 E 2013**

Estudante: Nickolas Mendes de Matos, matrícula 09/0127358

Menção: SS

Banca examinadora:



Prof. Dr. Eraldo Aparecido Trondoli Matricardi (Dep. de Engenharia Florestal – UnB)
(Orientador)



Prof. Dr. Carlos Henke de Oliveira (Dep. de Ecologia – UnB)



MSc. Fabrício Assis Leal (Dep. de Engenharia Florestal – UnB)

Brasília – DF, 04 de dezembro de 2014

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus por tudo que tens feito em minha vida, pelas alegrias, por minha maravilhosa família, pela saúde, pelos amigos e por todos as virtudes e desafios que me possibilitam crescer a cada dia.

Aos meus pais, que são os meus exemplos de vida, agradeço por toda a dedicação e carinho. Pai, muito obrigado por todos os ensinamentos de vida e por todo o investimento a mim confiado. Mãe, obrigado por todos os seus conselhos e puxões de orelha. Às minhas queridas irmãs, Catherine e Julianna, vocês são as minhas alegrias diárias.

Um agradecimento mais que especial à minha família, a melhor parte de mim, que sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos, apoiando e incentivando. Aos meus queridos avós, que são exemplos de força, trabalho e amor: Manuel Pedrosa (*in memoriam*), Olindina Pedrosa, Lourival Chaves (*in memoriam*) e Amália Matos.

Ao ilustre doutor Marcelino M. Andrade, agradeço por todos os grandes conselhos e incentivos. À Elisângela Andrade, minha segunda mãe, agradeço por tanto amor e dedicação. Em especial agradeço às minhas queridas primas por todo o carinho e amor, amo muito vocês: Aline Mendes, Anna Karolina, Danielle Vanessa, Hannah Andrade, Jéssica Mendes, Maria Oliveira e Ruth Maria. Um abraço especial aos meus primos, vocês são demais: André Lucas e Pedro Lucas.

À Laíssa Domingues, agradeço com muito amor por toda sua paciência, companheirismo, carinho, incentivos, ensinamentos e compreensão. Você foi peça fundamental da minha formação acadêmica e pessoal. Não há palavras para expressar a minha gratidão.

Ao grande professor e amigo Eraldo Matricardi, quero agradecer pela paciência, conselhos, oportunidade e incentivo para a realização deste trabalho. Você foi fundamental para a minha formação. Sou eternamente grato.

Um obrigado especial aos meus grandes amigos/irmãos de faculdade: Edberto Moura, Eloízio do Nascimento, Matheus do Vale, Menic Sander e Pablo de Bem. Vocês foram fundamentais na minha formação. Muito obrigado por tantos momentos, gargalhadas e aprendizados. Vocês são demais.

Agradeço aos meus grandes amigos/irmãos de ensino médio por todas as risadas, ensinamentos, companheirismo e amizade. Dependendo de mim, nossa amizade vai longe: Ângelo Pereira, Carlos Vinicius, Ewerton Igor, Fernando Leal, Igor Albuquerque, João Everton, João Paulo, João Victor, Jorge Lucas, Lucas Vasconcelos, Matheus Ramiro, Kaio Lucas e Rafael Ulhoa.

Um muito obrigado ao ilustre Prof. Dr. Niro Higuchi e a toda sua equipe, que por meio do INPA (Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia), me proporcionaram uma das melhores experiências da minha vida acadêmica. Conhecer a Amazônia e todas as suas belezas extraordinárias foi muito gratificante. Não tenho palavras para agradecer tal oportunidade.

Agradeço aos Eng. Florestais Eduardo Felizzola e Rogério Vereza, que por meio da Greentec Tecnologia Ambiental me proporcionaram grandes experiências profissionais.

Um agradecimento especial a todos os Professores de graduação, principalmente aos professores e amigos: Alcides Gatto, Alba Valéria, Carlos Henke, Eder Miguel, Gentil, Heloísa Miranda, Henrique Chaves, Manoel Cláudio, Reginaldo Pereira, Renato Castro e Reuber Brandão. Agradeço também aos meus amigos Fabrício Leal, Greison Moreira e Priscilla Lacerda pela amizade e ensinamentos.

À Universidade de Brasília, ao Dep. de Engenharia Florestal e a todo o povo brasileiro, que me proporcionaram a oportunidade de concluir minha graduação em uma universidade pública.

*Aos meus pais, José Henrique e Maria,
Às minhas irmãs, Catherine e Julianna,
e a toda minha família,
dedico.*

*“A captura do fogo pelo homem mudou
para sempre a história natural do planeta terra.*

*Nada conferiu tanto poder ao homem,
e nenhuma tecnologia humana influenciou
o planeta tão amplamente e por tanto tempo.”*

Stephen. J. Pyne

RESUMO

O objetivo geral do presente estudo foi analisar a dinâmica espacial e temporal das áreas queimadas corridas no bioma Pantanal no período de 2003 a 2013. Neste trabalho foram utilizados dados do produto MCD45A1, os quais fornecem mensalmente informação sobre áreas queimadas em escala global. Primeiramente, avaliou-se a acurácia do produto por meio da classificação supervisionada de uma cena LANDSAT TM, tida como verdade terrestre. Após a avaliação de acurácia, quantificou-se a ocorrência de áreas queimadas por ano e por vegetação, segundo dados do PROBIO, bem como a recorrência das queimadas. Para a análise espacial do padrão de distribuição das áreas queimadas, considerou-se o centroide dos polígonos mapeados pelo MCD45A1 como eventos pontuais. As estatísticas não-paramétricas utilizadas no estudo foram a função K de Ripley e o estimador de densidade Kernel, de forma conjunta. Posteriormente, a partir desta escala definida pela função K, foram gerados mapas de densidade da distribuição de queimadas. Ao final, para caracterizar os principais fatores ambientais e socioeconômicos que influenciam a ocorrência dos incêndios florestais, utilizou-se o modelo probabilístico *Probit*. Os erros de inclusão e exclusão para as áreas queimadas foram de 29% e 40%, respectivamente. A exatidão global da classificação foi de 96% e o índice Kappa foi 0,64, sendo considerado muito bom. No período de estudo, o ano que mais apresentou áreas queimadas foi 2005, com 8.559 Km², seguido dos anos 2007 e 2004, com 8.241 Km² e 7.603 Km², respectivamente. As classes de cobertura e uso da terra mais atingidas por queimadas foram as áreas naturais de savana (Cerrado e Estépica) e formação pioneira. O padrão de distribuição espacial das queimadas variou em diferentes escalas. Os valores obtidos apontam para a rejeição da hipótese de Completa Aleatoriedade Espacial (CAE), ou seja, apresentaram padrão agrupado de distribuição espacial, com escala máxima de agrupamento de 77 Km. No período analisado, a região sul e central do Bioma, especificamente o município de Corumbá/MS e pequena parte do município de Porto Murtinho/MS apresentaram densidade muito alta e alta de queimadas; nenhuma UC está inserida em áreas com densidade muito alta de queimadas; apenas quatro unidades estão em regiões com densidade alta; e as outras unidades estão localizadas em regiões com densidade média, baixa e muito baixa de áreas queimadas. Com base nos resultados é possível direcionar políticas de prevenção e combate aos incêndios florestais em áreas específicas, com raio mínimo de atuação de 77 Km. Segundo o modelo *Probit*, as variáveis que afetaram a ocorrência dos incêndios na área, à 95% de probabilidade, foram: precipitação, proximidade de áreas antrópicas, proximidade de rodovias, altitude, latitude, longitude e lat x long. Em relação as variáveis locais, nem todas apresentaram significância estatística, apenas: Unidade de Conservação, Savana-Cerrado, Savana-Estépica e Áreas de transição. As variáveis temporais que apresentaram probabilidade de ocorrência foram: 2004, 2005, 2007, 2008, 2010, 2011 e 2012. Finalmente, à luz dos resultados alcançados, estratégias e políticas poderão ser desenvolvidas, com o objetivo de mitigar os impactos causados pelo excesso de áreas queimadas.

Palavras-chave: Pantanal. Áreas queimadas. MODIS MCD45A1. Estatísticas espaciais. Modelo Probit.

ABSTRACT

The aim of this study was to quantify, analyze and understand the forest fires in the Pantanal biome in the period from 2003 to 2013. In this paper we used data from the MODIS MCD45A1 product, which provides monthly information about burned areas globally. Firstly of all, the accuracy of the product was evaluated by means of supervised classification of a Landsat TM scene, which was taken as ground truth. The spatial analysis of the pattern of burned areas distribution, considered the centroid of the polygons mapped by MCD45A1 product as point events. The nonparametric statistics used in the study were both the Ripley's K function and the kernel density estimator. Subsequently, from the scale defined by the K function was generated a density map of the distribution of fires. Finally, to characterize environmental and socioeconomic factors that influence the occurrence of forest fires, we used the Probit probabilistic model. The errors of inclusion and exclusion for burned areas were 29% and 40%, respectively. The global accuracy was 96% and the Kappa index was 0.64, what is considered as very good. During the study period, the year that showed most burned areas was 2005, with 8,559 Km², followed by 2007 and 2004, with 8,241 Km² and 7,603 Km² respectively. The cover classes and land use most affected by fires was natural areas of savannah (Cerrado and Estépica) and pioneer forests. The spatial pattern of fires varied in different scales. The values obtained indicate rejection of the hypothesis of complete spatial randomness (CSR), in other words, the observed values of L remain outside the confidence interval and the upper limit of the interval therefore have clustered spatial pattern, where the clustering maximum scale was 77 Km. In the analyzed period, the south and central region of the biome, specifically the city of Corumbá/MS and a small part of Porto Murtinho/MS county showed regions with very high density of fires; no Conservation Units are found inserted in very high density of fires areas; only four units are in high density areas; and other units are located in regions with low and very low density of burned areas. Based on the results, it is possible to aim prevention and forest fires fight policies in specific areas, with a minimum radius of 77 Km of action. According to the Probit model, the variables that affect the occurrence of fires in the area, with 95% probability, were: rainfall, proximity to disturbed areas, proximity to roads, elevation, latitude, longitude and lat x long. Regarding local variables, not all were statistically significant, only: Conservation Unit, Savana-Cerrado, Savana-Estépica and transition areas. Temporal variables that showed the probability of occurrence were: 2004, 2005, 2007, 2008, 2010, 2011 and 2012. Finally, in light of the results achieved, strategies and policies can be developed with the objective of mitigating the impacts of excess burned areas.

Key words: Pantanal. Burned areas. MODIS MCD45A1. Spatial Statistics. Probit model.

SUMÁRIO

RESUMO.....	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE TABELAS.....	xiv
PRINCIPAIS TERMINOLOGIAS RELACIONADAS AO FOGO.....	15
INTRODUÇÃO GERAL	15
OBJETIVOS.....	17
Geral	17
Específicos	17
CAPÍTULO I	18
1.1. REFERENCIAL TEÓRICO	18
1.1.1. O Bioma Pantanal	18
1.1.2. Incêndios Florestais.....	24
1.1.2.1. Principais fatores que afetam os incêndios florestais	26
1.1.2.2. O Fogo no Pantanal	28
1.1.3. Sensoriamento remoto como ferramenta de detecção e monitoramento de incêndios e queimadas.....	30
1.1.4. O sensor MODIS	32
1.1.4.1. Produtos MODIS	34
1.1.4.2. Detecção de focos de incêndios (MOD14).....	36
1.1.4.3. Detecção de áreas queimadas (MCD45A1)	37
1.1.4.4. O algoritmo MCD45A1	39
1.1.5. Imagens de satélite LANDSAT 5 TM.....	41
1.1.6. Análise espacial de dados geográficos	42
1.1.6.1. Função K de Ripley	43
1.1.6.2. Estimador de Densidade Kernel.....	44
1.1.7. Modelo probabilístico espacial.....	46
CAPÍTULO II: MAPEAMENTO TEMPORAL E VALIDAÇÃO DE ÁREAS QUEIMADAS POR MEIO DO PRODUTO MODIS MCD45A1 PARA O BIOMA PANTANAL	48
2.1. INTRODUÇÃO.....	48
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	49

2.2.1. Área de estudo	49
2.2.2. Etapas do trabalho	50
2.2.2.1. Mapeamento das áreas queimadas	50
2.2.2.2. Avaliação de acurácia do mapeamento	51
2.2.2.3. Quantificação e recorrência das áreas queimadas	53
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
2.4. CONCLUSÕES	62
CAPÍTULO III: ANÁLISE DO PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS ÁREAS QUEIMADAS NO BIOMA PANTANAL	63
3.1. INTRODUÇÃO	63
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	64
3.2.1. Área de estudo	64
3.2.2. Base de dados	64
3.2.3. Função K de Ripley	65
3.2.4. Estimador de densidade Kernel	65
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
3.4. CONCLUSÕES	70
CAPÍTULO IV: MODELO PROBABILÍSTICO ESPACIAL DE ÁREAS QUEIMADAS NO BIOMA PANTANAL	71
4.1. INTRODUÇÃO	71
4.2. MATERIAL E MÉTODOS	72
4.2.1. Área de estudo	72
4.2.2. Modelo conceitual	72
4.2.3. Base de dados	75
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
4.4. CONCLUSÕES	84
CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
APÊNDICE A	97

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1.1 - Limite do bioma Pantanal. Imagem MOD09A1, composição RGB 6/2/1.	18
Figura 1.2 - Subdivisão da bacia do Pantanal (ADÁMOLI, 1982).	19
Figura 1.3 - Precipitação média mensal de 2004 a 2012. Estação 83513 Nhumirim (Nhecolândia).	20
Figura 1.4 – Mapa do uso e cobertura da terra do bioma Pantanal até 2002 (PROBIO – Pantanal).	24
Figura 1.5 - Número de focos ativos de 2003 a 2013 nos estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul.	30
Figura 1.6 - Estimador de densidade Kernel.	45

CAPÍTULO II

Figura 2.1 - Localização das cenas MODIS.	50
Figura 2.2 – Visão geral dos pontos sorteados aleatoriamente sobre a imagem LANDSAT TM cena 226/72 (RGB 5/4/3).	52
Figura 2.3 - Cena LANDSAT TM utilizada para a validação do produto. Em (a) observa-se as áreas queimadas escuras na cena; em (b) os polígonos em vermelho correspondem às áreas queimadas mapeadas pela classificação supervisionada da imagem; e em (c) observa-se polígonos em vermelho obtidos do produto MCD45A1.	54
Figura 2.4 - Visão geral das áreas queimadas obtidas pelo produto MCD45A1 em relação à cena LANDSAT TM.	55
Figura 2.5 - Área total queimada no bioma Pantanal nos anos de 2003 a 2013.	58
Figura 2.6 - Mapa de recorrência de queimadas no bioma Pantanal, no período de 2003 a 2013.	60

CAPÍTULO III

Figura 3.1 - Função K de Ripley para as queimadas no bioma Pantanal de 2003 a 2013.	66
Figura 3.2 - Mapa de densidade de queimadas no bioma Pantanal.	68
Figura 3.3 - Mapa de densidade das queimadas e as Unidades de Conservação presentes no Bioma Pantanal.	69

CAPÍTULO IV

Figura 4.1 - Probabilidade da ocorrência de incêndios em relação a variação da precipitação (mm).	77
Figura 4.2 - Probabilidade da ocorrência de incêndio florestal com a variação da distância de rodovias.	78
Figura 4.3 - Probabilidade da ocorrência de incêndios com a variação da distância de áreas antrópicas.	79
Figura 4.4 - Probabilidade da ocorrência de incêndios em relação a variação de altitude.	80

Figura 4.5 - Probabilidade da ocorrência de incêndios em relação a variação no sentido longitude.	81
Figura 4.6 - Probabilidade da ocorrência de incêndios em relação a variação no sentido latitude.	81
Figura 4.7 - Probabilidade da ocorrência de incêndios em relação a variação no sentido diagonal (lat x long).	81
Figura 4.8 - Probabilidade da ocorrência dos incêndios florestais.	82
Figura 4.9 - Probabilidade de ocorrência de incêndios dentro e fora das Unidades de Conservação localizadas no Pantanal.	83
Figura 4.10 - Probabilidade de ocorrência de incêndios florestais em diferentes tipos de vegetação.	83

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1.1 – Quantificação (Km ²) da cobertura vegetal do bioma Pantanal mapeadas até 2002, segundo dados do PROBIO – Pantanal (MMA, 2002).	22
Tabela 1.2 - Características gerais das bandas 1 a 36 do sensor MODIS.....	33
Tabela 1.3 - Alguns produtos para a superfície terrestre gerados pelo sensor MODIS	35
Tabela 1.4 - Características e aplicações das bandas TM e ETM dos satélites LANDSAT 5 e 7.	42

CAPÍTULO II

Tabela 2.1 - Matriz de confusão, acurácia do produtor e do usuário em relação as áreas queimadas e não queimadas do produto MCD45A1 e LANDSAT TM.	56
Tabela 2.2 - Áreas queimadas por cobertura e uso da terra segundo dados do PROBIO.	58
Tabela 2.3 - Recorrência das queimadas no bioma Pantanal no período de 2003 a 2013.	59

CAPÍTULO IV

Tabela 4.1 - Base de dados utilizados no presente trabalho.	75
Tabela 4.2 - Resultados da regressão Probit.	76

PRINCIPAIS TERMINOLOGIAS RELACIONADAS AO FOGO

Fogo: de modo geral, é o termo aplicado ao fenômeno físico resultante da combinação entre oxigênio e uma substância qualquer, com produção de calor, luz e chamas. Trata-se de uma reação química de oxidação (SOARES; BATISTA, 2007);

Queimada: é um termo prático atribuído, de forma geral, à queima controlada, isto é, o emprego do fogo como fator de produção e manejo em atividades agropastoris ou florestais, bem como para fins de pesquisa científica (IBAMA, 2014);

Incêndio Florestal: é a ocorrência de fogo fora de controle em qualquer tipo de vegetação, onde muitas vezes pode ser ocasionado por queimadas que não foram devidamente autorizadas, aceiradas e monitoradas (IBAMA, 2014).

O presente trabalho não procurou diferenciar incêndios florestais de queimadas, desta forma, o termo que será utilizado para a caracterização dos eventos foi *áreas queimadas*.

INTRODUÇÃO GERAL

Entre os vários problemas ambientais enfrentados pelo Brasil, as queimadas e incêndios florestais estão entre os principais, uma vez que as emissões dos gases resultantes da queimada da biomassa coloca o País entre os principais responsáveis pelo lançamento de gases do efeito estufa, que, além de contribuir com o aquecimento global e consequente mudanças climáticas, causa inúmeros prejuízos econômicos, sociais e ambientais, entre eles: perda da biodiversidade, desertificação e desflorestamento (IBAMA, 2013).

O calor liberado pelo fogo causa danos significativos ao solo, incluindo a diminuição dos nutrientes e da matéria orgânica, em decorrência do aumento da temperatura do solo (COUTINHO, 1980), o aumento da erosão e mudança das características físicas e químicas (SOARES; BATISTA, 2007). A queima da biomassa vegetal é uma das principais fontes responsáveis pelo lançamento de gases e partículas aerossóis, com influência significativa na química da atmosfera, nas propriedades das nuvens e no saldo da radiação (KAUFMAN et al., 1998; GRÉGORIE et al., 2003). Além do mais, o excesso de queimadas pode causar impactos na estrutura e composição da vegetação, bem como impactos direto e indiretos na fauna local.

No Brasil, a ocorrência de incêndios florestais é uma realidade, o que tem causado sérios danos ambientais e econômicos. Neste sentido, é necessário que se estabeleçam políticas de prevenção e combate aos incêndios florestais. No entanto, para se chegar a esse estágio é preciso saber onde, quando e porque ocorrem os incêndios, pois a falta de informações sobre incêndios pode levar a gastos muito altos em proteção ou gastos muito pequenos (SOARES; BATISTA, 2007). Segundo dados do IBGE e MMA (IBGE, 2005), em 64% dos 5.560 municípios brasileiros a poluição atmosférica é causada principalmente por queimadas, mesmo em municípios mais industrializados. Se considerada por região, esta porcentagem varia de 93% na região norte a 42% na região sul.

Existem diversos métodos de detecção de incêndio, como por exemplo, sistemas de vigilância móvel, sistemas de vigilância fixa, entre outros. Nas últimas décadas, o sensoriamento remoto vem ganhando espaço como técnica que auxilia na detecção mais eficiente de incêndios e de focos de calor, permitindo, desta forma, ações mais rápidas e auxiliando na tomada de decisão. Além do mais, algumas informações importantes podem ser extraídas por meio do sensoriamento remoto, em diferentes graus de precisão, a saber: quantificação de áreas queimadas, distribuição espacial de suas ocorrências, períodos mais críticos do ano, tipo de vegetação mais atingida e as relações destas informações com os centros urbanos, rodovias e atividade agrícola (OLIVEIRA, 2006).

Desta forma, a obtenção de imagens terrestre, por meio de sensoriamento remoto, o estudo dos fenômenos naturais e dos distúrbios ocorridos na superfície terrestre e o desenvolvimento de algoritmos mais eficientes para a detecção e avaliação destes fenômenos, em especial os incêndios florestais, corroboram para a tomada de decisão e planos de ações mais rápidos e eficientes.

OBJETIVOS

Geral

O objetivo geral do presente trabalho foi analisar a dinâmica espacial e temporal das áreas queimadas ocorridas no bioma Pantanal, no período de 2003 a 2013.

Específicos

- Mapear as áreas queimadas no bioma Pantanal por meio do produto MODIS MCD45A1;
- Validar o produto a partir de uma classificação supervisionada, cena LANDSAT TM, para o ano que mais apresentar áreas queimadas;
- A partir de dados do PROBIO – Pantanal, quantificar a ocorrência de áreas queimadas por formação vegetal;
- Analisar o padrão de recorrência das queimadas;
- Analisar o padrão espacial das áreas queimadas ocorridas na área de estudo com base na função K de Ripley e estimador de densidade Kernel; e
- Verificar por meio do modelo *Probit* os fatores que influenciam a probabilidade de ocorrência das áreas queimadas na área de estudo com base na distribuição espacial, características físicas e socioeconômicas.

CAPÍTULO I

1.1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1.1. O Bioma Pantanal

O Pantanal, além de Patrimônio Nacional, foi declarado como Reserva da Biosfera e Patrimônio Mundial Natural pela Organização Mundial das Nações Unidas para Educação, a Ciência e a Cultura (Unesco) (JURAS, 2010). O Bioma cobre aproximadamente 150.355 Km² (**Figura 1.1**), ocupando cerca de 2% da área total do território brasileiro (IBGE, 2004) e está localizada entre os paralelos 16° e 22° de latitude sul e entre os meridianos 55° e 59° de longitude oeste (ALLEM; VALLS, 1987). No Brasil, distribui-se pelos estados de Mato Grosso (35%) e Mato Grosso do Sul (65%) e continua pela Argentina, pequenas partes da Bolívia e Paraguai, onde é chamado de Chaco.

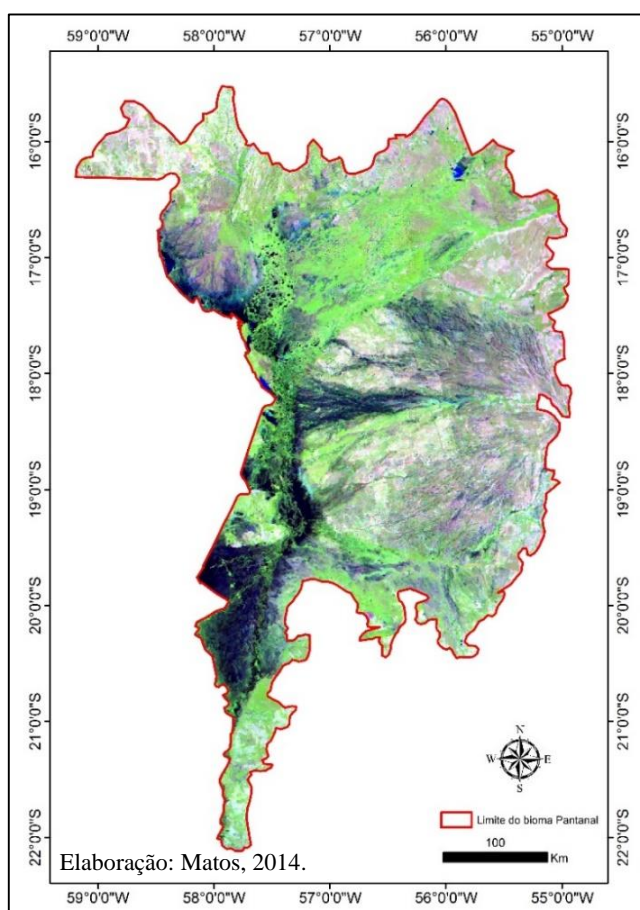


Figura 1.1 - Limite do bioma Pantanal. Imagem MOD09A1, composição RGB 6/2/1.

O Pantanal é a maior planície inundável do mundo e contém importante riqueza de diversidade biológica terrestre e aquática. A altitude é de aproximadamente 150 metros

sobre o nível do mar e o relevo é plano. No período seco, o Pantanal se assemelha ao cerrado. Entretanto, no período de chuvas, modifica-se drasticamente, com a formação de grandes áreas alagadas (até 80% da planície se inunda). Os ecossistemas que o bioma abriga são extremamente frágeis e estão sob a ameaça das novas tendências de desenvolvimento econômico e de construção de infraestrutura (SFB, 2014).

O ciclo de inundação no Pantanal é do tipo monomodal, isto é, marcado por ciclos que variam de intensidade no decorrer dos anos, havendo alternâncias de anos muito chuvosos ou anos relativamente secos (HOMILTON et al., 1996).

A heterogeneidade edáfica e hidrológica do Pantanal impossibilita uma caracterização generalizada. Uma característica comum é a existência de uma planície sedimentar que é periodicamente inundada. Existem variações de solo, flora, fauna e uso pecuário de acordo com a origem dos sedimentos e o tipo de inundação (SANTOS, 2001). Devido a heterogeneidade da bacia do Pantanal, Adámoli (1982), caracterizou 10 sub-regiões em função das diferentes alturas, época, duração e grau da inundação, são elas: Cáceres, Poconé, Barão de Melgaço, Paiaguás, Nhecolândia, Aquidauana, Miranda, Abobral, Paraguai e Nabileque (**Figura 1.2**). Mais tarde, outros autores também dividiram o Pantanal em sub-regiões com base em outros atributos.

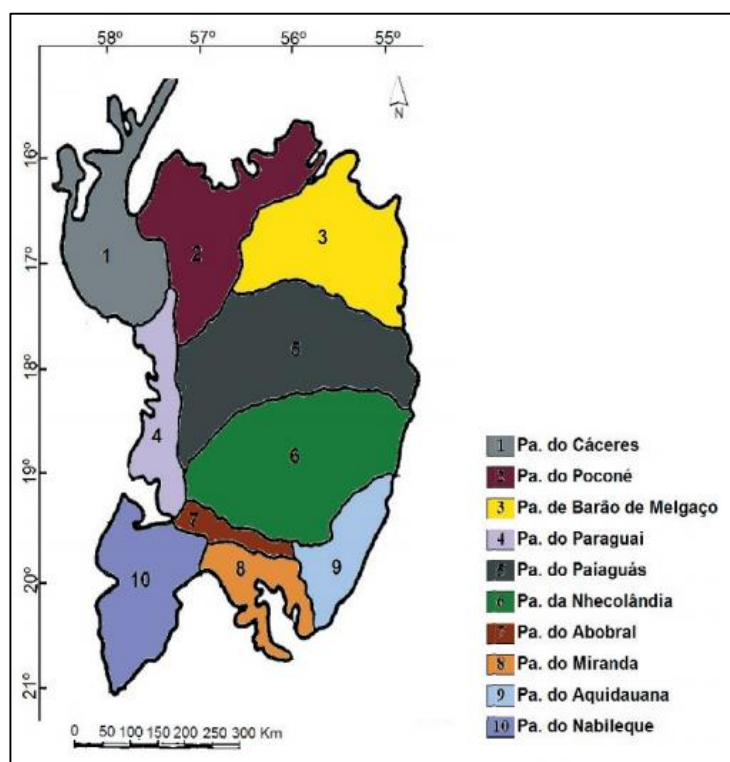


Figura 1.2 - Subdivisão da bacia do Pantanal (ADÁMOLI, 1982).

Fonte: Adaptado de Faria et al. (2013).

O clima da região é do tipo Aw, segundo a classificação climática de Köppen, quente com semestres de inverno seco. A precipitação pluviométrica varia de 1.000 a 1.400 mm por ano, sendo que 80% das chuvas caem no período de verão, entre novembro e março (**Figura 1.3**). A evaporação é bastante alta, superando a precipitação no período de seca. A região não sofre influências oceânicas, mas está exposta à invasão de massas frias provenientes das porções mais meridionais (ALLEM; VALLS, 1987). O clima é fortemente sazonal, com temperatura média anual em torno de 25°C, entre os meses de setembro a dezembro as temperaturas máximas absolutas ultrapassam 40°C (PCBAP, 1997b).

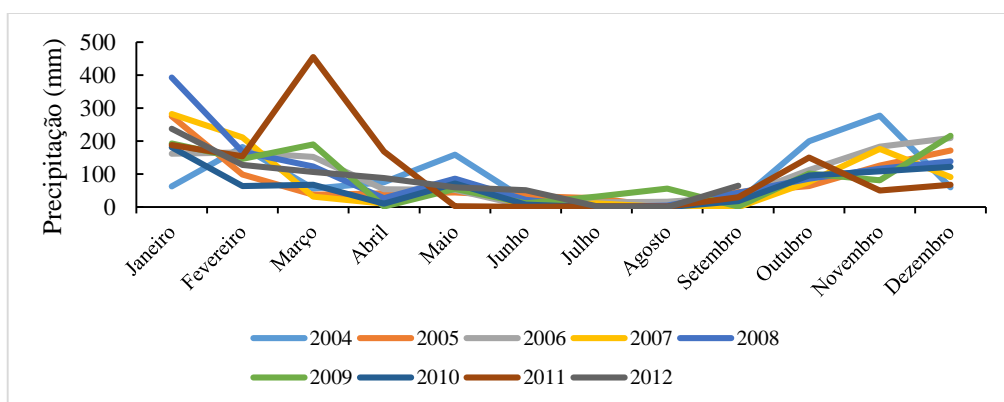


Figura 1.3 - Precipitação média mensal de 2004 a 2012. Estação 83513 Nhumirim (Nhecolândia).

Fonte: INMET (2014).

Os solos do Pantanal são de origem sedimentar, recente ou sub-recente, ocorrendo em fases arenosa e argilosa (ALLEM; VALLS, 1987). De acordo com Santos (2001), grande parte do bioma Pantanal é formado por solos hidromórficos, o que reflete uma drenagem deficiente e com tendências a inundações periódicas e prolongadas, arenosos e de baixa fertilidade. Os solos apresentam características bastante diversificadas, são influenciados pelos sedimentos de origem e pelo regime de inundação, de pobre em bases (Álicos e Distróficos) a teor de sódio elevado, têm a constituição de essencialmente arenosa à ocorrência de elevada quantidade de argilas expansivas, mudança textural abrupta em profundidade, dentre outras (PCBAP, 1997b).

O Pantanal está inserido no domínio do Paraná e é drenado pelos cursos inferiores e médios dos afluentes da margem esquerda do alto rio Paraguai, cujas cabeceiras estão localizadas no Cerrado (MMA, 2007). O manancial hídrico da região é admirável. Inúmeros rios percorrem a região pantaneira, sendo o rio Paraguai o mais importante. Ele percorre toda a região, no sentido norte-sul, tendo 2.730 Km de extensão desde suas

nascentes até o encontro com o rio Paraná, na fronteira argentino-paraguaia. Outros rios, afluentes do rio Paraguai, têm zonas de influência na região, são eles: rio Negro, Miranda, Aquidauana, Bento Gomes, Nabileque, Taquari, Cuiabá, entre outros (ALLEM; VALLS, 1987).

Atualmente, os campos naturais e áreas florestais presentes na região pantaneira vêm sendo substituídos gradativamente por pastagens artificiais (NUNES DA CUNHA; JUNK, 2009). De acordo com Silva et al. (1998), a colonização da região teve início no século XVIII, onde a principal atividade era o garimpo, porém, como o declínio dessa atividade consolidou-se na região a pecuária extensiva, sendo a principal atividade econômica da região até os dias de hoje.

No Pantanal, convergem quatro das mais importantes províncias fitogeográficas do Continente (ADÁMOLI, 1987):

- Floresta Amazônica: manifesta sua influência a noroeste da alta bacia do rio Paraguai, ocupando as encostas e planaltos das serras, planícies onduladas e galerias fluviais;
- Cerrado: ocupa a maior superfície na bacia superior do rio Paraguai; ocupa cerca de 70% do total dos tipos de vegetação no Pantanal; a vegetação nas faixas mais próximas às planícies inundáveis tem alta porcentagem de pastagens e de campos alagadiços;
- Chaco: a maior influência florística sobre o Pantanal manifesta-se ao sul, mostrando elementos de transição no território brasileiro e boliviano;
- Floresta Atlântica: com influência florística principalmente a sudeste e ao sul, com a presença de florestas e campos, estando quase sempre interligada à vegetação de Cerrado.

De acordo com Coutinho (2006), sua vegetação é constituído por um complexo ou mosaico de diferentes biomas florestais de hidrobiomas e helobiomas (carandazais, paratudais), savânicos de piro-peinobiomas (cerrados das cordilheiras entre lagoas), florestais de litobiomas (florestas tropicais estacionais caducifólias sobre afloramentos rochosos e solos rasos), campestres de hidro-helobiomas (campos inundáveis), em meio a rios, lagoas de água doce (baías), lagoas de água salobra e alcalina (salinas), entre outras. Segundo Eiten (1982), citado por Allem e Valls (1987), durante a estação chuvosa, o lençol freático aproxima-se da superfície, gerando vastas áreas alagadas, devido a pobre capacidade do solo de drenar essa água ou da própria inundação dos rios. As áreas bem

drenadas, são cobertas com vegetação de Cerrado. Segundo Allem e Valls (1987), a vegetação forrageira de pantanais de solo argiloso (por exemplo, Nabileque) tem maior riqueza de espécies que aquela encontrada em pantanais de solo arenoso (por exemplo, Nhicolândia).

Em 2002, o bioma Pantanal ainda se apresentava bastante conservado, com 88,4% de sua área ocupada por vegetação natural. A maior parte das áreas antrópicas no Bioma são de pecuária extensiva em pastagens plantadas, 10,9% da área total do Bioma, sendo que as áreas de agricultura, à época, eram inexpressivas. Em relação a vegetação natural, grande parte é constituída por Savana Arborizada e Savana Gramíneo-Lenhosa. A Savana (Cerrado) predomina em mais de 50% do Pantanal (SILVA et al, 2007). A **Tabela 1.1** a seguir apresenta a quantificação da cobertura vegetal para todo o Pantanal até o nível de subformação, de acordo com a legenda de vegetação do Bioma Pantanal elaborada a partir do Sistema Fitogeográfico Brasileiro, na escala de 1:250.000.

Tabela 1.1– Quantificação (Km²) da cobertura vegetal do bioma Pantanal mapeadas até 2002, segundo dados do PROBIO – Pantanal (MMA, 2002).

Região Fitoecológica, Formação ou Subformação	Código	Área (Km ²)
I - Floresta Estacional Semi-decidual		
Aluvial (Mata, Mata Ciliar) – ao longo dos flúvios	Fa	6131.0
Submontana (Mata, Mata Seca)	Fs	92.3
II - Floresta Estacional Decidual		
Aluvial (Mata, Mata Ciliar) - ao longo dos flúvios	Ca	9.6
Terras Baixas (Mata, Mata Seca, Mata Calcária)	Cb	519.0
Submontana (Mata, Mata Seca, Mata Calcária)	Cs	910.0
III - Savana (Cerrado)		
Arborizada + Florestada	Sa+Sd	7863.5
Arborizada + Gramíneo-Lenhosa	Sa+Sg	4823.6
Arborizada com floresta-de-galeria	Saf	3460.9
Arborizada sem floresta-de-galeria	Sas	21745.0
Florestada (Cerradão)	Sd	8984.0
Florestada + Arborizada	Sd+Sa	5881.5
Florestada+ Gramíneo-Lenhosa	Sd+Sg	1669.4
Gramíneo-Lenhosa + Arborizada	Sg+Sa	13198.8
Gramíneo-Lenhosa + Florestada	Sg+Sd	3023.3
Gramíneo-Lenhosa com floresta-de-galeria	Sgf	1320.5
Gramíneo-Lenhosa sem floresta-de-galeria	Sgs	7560.2
IV - Savana (Estépica)		
Arborizada + Florestada	Ta+Td	76.7
Arborizada + Gramíneo-Lenhosa	Ta+Tg	244.2
Arborizada com floresta-de-galeria	Taf	6.6
Arborizada sem floresta-de-galeria	Tas	206.7
Florestada + Arborizada	Td+Ta	3.6
Gramíneo-Lenhosa + Arborizada	Tg+Ta	490.3
Gramíneo-Lenhosa com floresta-de-galeria	Tgf	3439.9

Continua...

Tabela 1.1 – Continuação...

Gramíneo-Lenhosa sem floresta-de-galeria	Tgs	1086.2
Parque com floresta-de-galeria	Tpf	4823.5
Parque sem floresta-de-galeria	Tps	1767.2
V - Formação Pioneira		
Formação Pioneira	P	803.9
Vegetação com Influência Fluvial, e/ou Lacustre (Cambarazal, Pateiral, Pimenteiral, etc)	Pa	5216.2
VI - Áreas de Tensão Ecológica ou Contatos Florísticos		
Ecótono		
Savana/Floresta Estacional Decidual (Mata)	SNt(SCt)	315.9
Savana/Floresta Estacional Semi-decidual (Mata)	SNt(SFt)	2258.5
Savana/Formações Pioneiras (Cerrado, Campo Sujo, Cambarazal)	SPt(S+Pa)	16429.5
Savana/Savana Estépica Arborizada	STt(Ta+Sa)	1.8
Floresta Estacional Semi-decidual/Formações Pioneiras (Mata)	NPt(F+Pa)	4697.5
Savana Estépica/Formações Pioneiras (Chaco, Campo Sujo)	TPt(T+Pa)	842.9
Encrave		
Savana/Floresta Estacional Decidual (Mata)	SNc/(Sd+Cb)_SCc	53.3
Savana/Floresta Estacional Decidual (Mata)	SNc/(Sd+Cs)_SCc	904.9
Savana/Floresta Estacional Semi-decidual (Mata)	SNc/(Sd+Fs)_SFC	2406.7
VII - Refúgio Vegetacionais (comunidades Relíquias)		
Refúgio submontano herbáceo (Campo)	rsh	28.4
VIII - Áreas Antrópicas		
Agricultura na Região de Floresta Estacional Decidual de Terras Baixas	Ac.Cb	37.5
Agricultura na Região de Floresta Estacional Decidual Submontana	Ac.Cs	316.4
Agricultura na Região de Savana	Ac.S	37.6
Pastagem plantada na Região de Floresta Estacional Decidual de Terras Baixas	Ap.Cb	64.4
Pastagem plantada na Região de Floresta Estacional Decidual Submontana	Ap.Cs	319.6
Pastagem plantada na Região de Floresta Estacional Semi-decidual Aluvial	Ap.Fa	68.4
Pastagem plantada na Região de Floresta Estacional Semi-decidual Submontana	Ap.Fs	939.5
Pastagem plantada na Região de Savana	Ap.S	13408.8
Pastagem plantada na Região de Savana Estépica	Ap.T	1711.1
Áreas degradadas por mineração	Im	23.8
Influência Urbana	Iu	108.9
Vegetação Secundária de Floresta Estacional Decidual de Terras Baixas	Vs.Cb	15.8
Vegetação Secundária de Floresta Estacional Decidual Submontana	Vs.Cs	51.1
Vegetação Secundária de Floresta Estacional Semi-decidual Submontana	Vs.Fs	3.1
Vegetação Secundária de Savana	Vs.Sa	292.3
Vegetação Secundária de Savana Estépica Florestada	Vs.Td	38.7
Vegetação Secundária de Savana Estépica Parque	Vs.Tp	2.6
XI - Outros		
Massas d'água (rios, córregos, corixos, vazantes, baías, salinas)	Agua	2557.3

A **Figura 1.4** a seguir apresenta o mapa com as classes de uso e cobertura da terra até 2002, proveniente do Programa de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira (PROBIO).

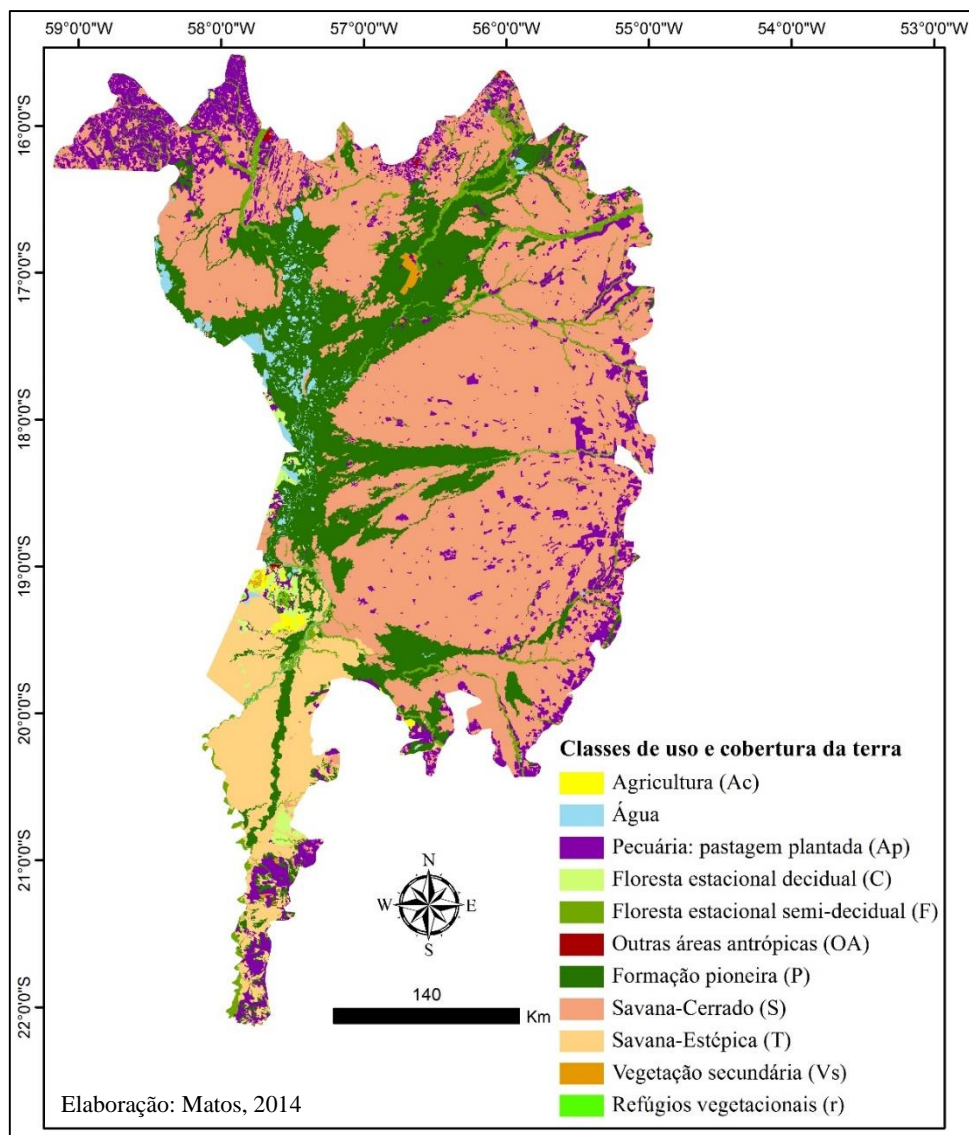


Figura 1.4 – Mapa do uso e cobertura da terra do bioma Pantanal até 2002 (PROBIO – Pantanal).

Fonte: PROBIO – Pantanal (MMA, 2002).

1.1.2. Incêndios Florestais

Muitos biomas convivem com o fogo e dependem dele para que determinadas espécies possam se regenerar e propagar, como por exemplo algumas espécies do Cerrado brasileiro (NUNES, 2005). De acordo com Salgado-Labouriau e Ferraz-Vicentini (1994), os incêndios ocorrem no Cerrado há mais de 32.000 anos AP (antes do presente). Por mais de 10.000 anos os incêndios naturais e os antrópicos ocorrem na região (MIRANDA et al., 2010).

Atualmente, observa-se um aumento da incidência de grandes incêndios, ocorrendo em quase todos os continentes e ecossistemas, independente da capacidade de combate e

gestão dos países atingidos. Por exemplo, durante 1997 e 1998, mais de 20 milhões de hectares foram queimados na América Latina, causando um gasto estimado de U\$ 10 a 15 bilhões (BOWMAN et al., 2009).

De forma geral, o fogo é considerado um processo ecológico que causa influências na estrutura dos ecossistemas, na composição e na ciclagem de nutrientes (KAUFFMAN et al., 1994), gerando impactos locais e regionais no uso do solo, produtividade, capacidade de carga, biodiversidade e impactos mais globais sobre os ciclos hidrológicos, biogeoquímicos e processos atmosféricos (ROY et al., 2002).

A queima de biomassa contribui significativamente na injeção de gases e partículas poluentes, os quais afetam as propriedades químicas da atmosfera e troposfera, com impacto direto sobre o balanço radioativo da superfície, propriedades das nuvens e na qualidade do ar (GRÉGOIRE et al., 2003; KAUFMAN et al., 2003; GRÉGOIRE et al., 2013). Do total dos gases de origem antrópica emitidos para a atmosfera, 40% do dióxido de carbono, 16% do metano e 43% do monóxido de carbono são oriundos da queima da biomassa (HOUGHTON et al., 1995, citado por GRÉGOIRE et al., 2003). Segundo Andreae (1991), na América do Sul a queima de biomassa é responsável pela emissão de 30 Tg por ano de partículas aerossóis na atmosfera.

Além dos efeitos na atmosfera, as queimadas causam sérios impactos sobre a vegetação. O fogo tem ocorrido nos ecossistemas por centenas de milhões de anos, ajudando a moldar a distribuição global dos biomas e influenciando a estrutura e o funcionamento dos ecossistemas (BOND et al., 2005). Os impactos do fogo sobre a vegetação vão depender do tipo do regime de queima, do comportamento do fogo (MIRANDA et al., 2010), do ciclo de vida das espécies vegetais atingidas, da mortalidade de adultos, da quantidade de germinação, do estabelecimento e da subsequente sobrevivência das plântulas após o fogo (WHELAN, 1995). Por exemplo, o regime do fogo no bioma Cerrado tem sofrido alterações, com queimadas ocorrendo no período seco e em curto intervalo de tempo, o que resulta em fisionomias mais abertas, em consequência das altas taxas de mortalidade, alterações nas taxas de recrutamento e consequentemente no favorecimento da vegetação rasteira (MIRANDA; SATO, 2005).

O calor gerado pelo fogo causa efeitos sobre o solo: promovendo o aumento da erosão, devido a maior exposição da superfície do solo através do consumo da cobertura vegetal, principalmente em terrenos acidentados; consumo total ou parcial da matéria

orgânica; e mudanças das características físicas e químicas do solo (SOARES; BATISTA, 2007). A temperatura do solo pode sofrer influência direta ou indireta dos incêndios. Os efeitos diretos são observados durante a passagem do fogo, alterando as temperaturas máximas do solo. Os efeitos indiretos são gerados pela alteração da cobertura vegetal, são mais persistentes e podem gerar maiores impactos que os efeitos diretos, pois a redução da cobertura vegetal, resultante do consumo de combustível e da deposição da camada de cinzas na superfície do solo, resulta em alterações no regime térmico do solo (MIRANDA et al., 2010).

O fogo é um distúrbio que também provoca impactos sobre a fauna, afetando a riqueza das comunidades ecológicas por meio dos efeitos diretos e/ou indiretos. Os efeitos diretos são mortes, queimaduras e intoxicação, podem ser facilmente mensurados pela simples contagem dos indivíduos mortos após a passagem do fogo ou através de um censo das populações antes e após a queimada. Os efeitos indiretos ocorrem após o fogo, onde a intensidade dos efeitos vão depender de uma série de fatores, que acarretam mudanças na estrutura das comunidades animais, devido às mudanças na paisagem (FRIZZO et al., 2011).

1.1.2.1. Principais fatores que afetam os incêndios florestais

Em escalas mais amplas, os incêndios respondem às variações do tipo de combustível, estrutura da vegetação, características topográficas e as condições climáticas da região (BOWMAN et al., 2009).

Pode-se dizer que a probabilidade do fogo ocorrer e se propagar é função da probabilidade de haver uma fonte de ignição e da probabilidade de haver condições propícias para a propagação do fogo (SOARES; BATISTA, 2007). Segundo Batista (2000), a ocorrência e propagação dos incêndios florestais em dada região é função de vários fatores associados, que, por sua vez, variam em função do ambiente, ou seja, a diversificação da ocorrência e a propagação dos incêndios são influenciados pelas características do ambiente.

De acordo com Soares e Batista (2007), a partir da análise de dois grupos de fatores, fonte de ignição e condições de propagação, é possível avaliar o potencial de onde e como o fogo vai se propagar. O primeiro fator, está relacionado as atividades que geram a faísca ou chama que iniciará o processo de combustão. No Brasil e outros países, as estatísticas sobre as ocorrências de incêndios florestais mostram que a grande maioria dos incêndios

iniciam a partir de fontes relacionadas direta ou indiretamente às atividades humanas. Já o segundo fator, diz respeito a todos os fatores do ambiente que influenciam direta ou indiretamente o desenvolvimento do fogo em uma região.

Segundo Soares e Batista (2007):

- Material combustível – Qualquer material orgânico, vivo ou morto, acima do solo, capaz de entrar em combustão. A quantidade de material combustível determinará se o fogo vai ou não se propagar, além de definir a intensidade de calor liberada. Outras características do material combustível também influenciam o comportamento do fogo: arranjo, continuidade, umidade, compactação e distribuição vertical.
- Condições climáticas – incluem vários elementos meteorológicos importantes na propagação dos incêndios, tais como: umidade relativa, vento, precipitação e temperatura, influenciam fortemente a ignição e a propagação dos incêndios. As condições climáticas de uma região determinam algumas características do material combustível, como por exemplo a umidade que é reflexo do clima e das condições atmosféricas e pode variar rapidamente.
- Topografia – influencia fortemente o clima e determina o tipo de combustível em determinado área, assim, a topografia influi decisivamente no comportamento do fogo. Os principais fatores topográficos que exercem influência são: *elevação ou altitude*, topos de montanhas e fundos de vales apresentam condições diferenciadas de queima durante um mesmo período de tempo; *exposição*, também chamado de azimute de orientação das encostas, é a direção do lado da montanha em relação aos pontos cardeais, apresenta efeito direto na possibilidade de ocorrência e propagação de um incêndio, uma vez que a diferença na quantidade de calor recebida pelas diversas exposições provoca uma série de reações que originam efeitos diversos no potencial de risco; *declividade*, à medida que o grau de inclinação aumenta a velocidade de propagação também aumenta, pois o fogo seca e aquece o material combustível localizado na parte superior do aclive com maior intensidade, uma vez que esse material fica mais exposto às ondas de calor, transmitidas tanto por radiação como por convecção.
- Tipo de cobertura vegetal – as propriedades dos combustíveis variam em função do tipo de cobertura vegetal que, por sua vez, influenciam o comportamento do fogo. Por exemplo, uma floresta aberta permite maior penetração dos raios solares e do vento, proporcionando aumento da temperatura do combustível e da taxa de

evaporação, conseqüentemente, o potencial de propagação do fogo é maior. Já em florestas densas e fechadas ocorre maior interceptação da radiação solar, o que reduz a temperatura do ar e do material combustível, ou seja, a vegetação funciona como uma barreira, evitando a livre passagem de correntes de ar, o que reduz a velocidade do vento em seu interior. Além disso, a maior taxa de transpiração do material florestal proporciona um aumento da umidade relativa do ar. Assim, todos esses fatores reunidos reduzem o risco de ignição e propagação de incêndios em florestas densas.

Vários estudos têm empregado os fatores supracitados para estabelecer zoneamento de risco de incêndios florestais. Entretanto, outras variáveis espaciais também têm sido utilizadas, como as estradas, declividade, exposição das encostas e outras (FERRAZ; VETTORAZZI, 1998).

Segundo Nunes (2005), de forma geral, o risco a ocorrência de um incêndio está relacionado a agentes que originam o fogo, enquanto o perigo aos incêndios relaciona-se com as causas que aumentam ou diminuem a probabilidade de sua ocorrência. O autor ressalta a importância de se explorar os vários fatores determinantes do risco e do perigo de incêndios florestais e a utilização dos índices de perigo de incêndio, de tal forma que possibilitem o melhor planejamento das atividades de prevenção, definição de regime de queima, a permissão para queimadas controladas em períodos menos perigosos, a previsão do comportamento do fogo visando a adoção de técnicas mais eficazes e advertência pública do grau de perigo.

1.1.2.2. O Fogo no Pantanal

O uso do fogo como elemento de manejo é polêmico, principalmente no Pantanal. O fogo vem sendo usado nesta região desde o início da criação de gado, há pelo menos 200 anos, antes disso provavelmente já haviam queimadas, causadas naturalmente e/ou pelos índios (PCBAP, 1997a).

Segundo Pott (1997), citado por Rodrigues et al. (2002), a utilização do fogo no Pantanal tem como objetivo eliminar ou conter a expansão de espécies indesejáveis, sendo feita de forma seletiva e localizada. Entretanto, ainda que o emprego da queimada no Pantanal seja feito de forma controlada, a sua utilização merece muita cautela, pois a falta de cuidado, para que o fogo não se espalhe para outras vegetações, quase sempre causa incêndios em capões, cordilheiras (que praticamente não têm gramíneas), brejos e campos

baixos. Essas áreas citadas não precisam ser queimadas, por terem gramíneas tenras e umidade de solo para prolongar o crescimento das mesmas (PCBAP, 1997a).

Com o emprego da queima, tem-se observado: que a frequência de espécies de gramínea na área de caronal (savana gramíneo-lenhosa) tem reduzido e houve um aumento do número de espécies de dicotiledônea e ciperáceas, quando comparados à área sem queima; a queima condiciona menor produção de biomassa aérea total, representando aproximadamente 25% da biomassa presente em áreas sem queima; e, exposição excessiva do solo após a queima (CARDOSO et al., 2000).

Aparentemente, a incidência de queimadas em pantanais de solos argilosos é menor que naqueles arenosos, pois a grande maioria de espécies invasoras estão localizadas nos pantanais de solos arenosos. Por exemplo, Nabileque apresenta um índice de incêndios menor que aquele do pantanal de Poconé. As áreas de carandazal afetadas por queimadas encontram-se em zonas mais altas e secas (ALLEM; VALLS, 1987).

De acordo com Graça et al. (1974), citado por Allem e Valls (1987), a composição forrageira nas partes mais altas do Pantanal estão diminuindo devido à ação das enchentes, do fogo e do excesso de pastejo. Por outro lado, fazendeiros têm observado a crescente invasão de plantas lenhosas nas pastagens nativas (como o cambará, espinheiros, etc.) quando se restringe o fogo nestas áreas (PCBAP, 1997a).

A **Figura 1.5** abaixo apresenta o número de focos de calor por mês registrados pelo satélite AQUA, de 2003 a 2013 em Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, estados que compõe o bioma Pantanal (INPE, 2014).

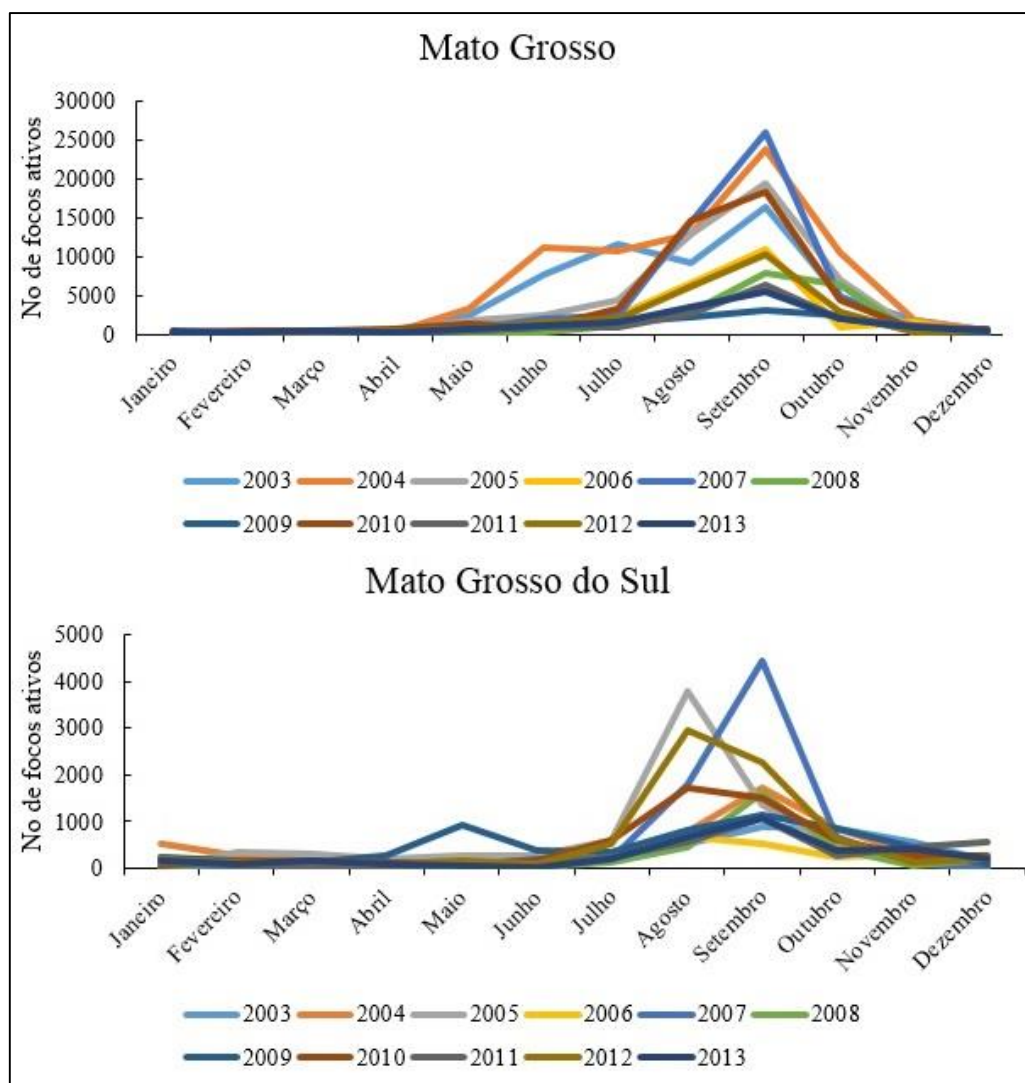


Figura 1.5 - Número de focos ativos de 2003 a 2013 nos estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul.

As queimadas no bioma pantanal ocorrem preferencialmente no período seco, uma vez que no período chuvoso grande parte da região encontra-se inundada. Este fato é preocupante e merece atenção, pois, de acordo com Miranda e Sato (2005), as queimadas durante a época seca resultam em mudanças bem mais significativas na estrutura e composição florística da vegetação do que as queimadas ocorridas na época chuvosa.

1.1.3. Sensoriamento remoto como ferramenta de detecção e monitoramento de incêndios e queimadas

O sensoriamento remoto é uma ferramenta ou técnica que faz uso de sensores para medir a quantidade de energia eletromagnética emanada de um objeto ou área geográfica à distância (JENSEN, 2009). Desta forma, os dados de sensoriamento remoto fornecem um meio prático e único para o monitoramento de queimadas (FLORENZANO, 2007),

que, por sua vez, trazem contribuições importantes para os estudos de mudanças climáticas, tais como: efeito estufa, chuva ácida, balanço de energia, formação de nuvens e precipitação (ROY et al., 2002).

Além do mais, a estimativa de áreas queimadas em escala global e regional é necessária para quantificar os efeitos do fogo na vegetação (MIETTINEN, 2007). Kaufman et al. (1990) reforçam a importância de se obter informações diretas sobre os incêndios a partir das imagens de satélite, pois, mesmo que as imagens de satélite não possam ser usadas diretamente para detectar a emissão de gases-traço, pode-se estimar esses valores devido a relação de proporcionalidade entre a quantidade de biomassa queimada e a quantidade de gases emitidos, tais como CO₂, que corresponde a aproximadamente 90% das emissões de gases liberados durante as queimadas.

Atualmente, as imagens de satélite são muito utilizadas para detectar focos de incêndios e áreas queimadas. A avaliação em larga escala da ocorrência desses eventos tem sido realizada, principalmente, por ERS ATSR (*Along Track Scanning Radiometer*), NOAA AVHRR (*National Oceanic Atmospheric Administration*), SPOT VEGETATION e TERRA/AQUA sensor MODIS, devido à alta resolução temporal e espacial (MIETTINEN, 2007). O sensor MODIS apresenta uma série de melhorias em relação aos sistemas do NOAA AVHRR e do GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), tais como resolução radiométrica, temporal e espectral (JUSTICE et al., 2002b).

Existem duas principais linhas de pesquisas relacionadas ao monitoramento e detecção de queimadas. A primeira linha está relacionada a detecção de focos de calor, ou seja o registro instantâneo apenas dos materiais com temperaturas de algumas centenas de graus centígrados, utilizando bandas espectrais do infravermelho termal (JUSTICE et al., 2002a; JUSTICE et al., 2002b; KAUFMAN et al., 1998; KAUFMAN et al., 2003; GIGLIO et al., 2003) e a segunda baseia-se na detecção da extensão das áreas queimadas, onde, geralmente, utilizam bandas espectrais da região do visível e infravermelho (ROY et al., 2002; ROY et al., 2005; ROY et al., 2008; ROY et al., 2009; ZHAN et al., 2002; GIGLIO et al., 2009; BOSCHETTI et al., 2010; GRÉGOIRE et al., 2013; ANDERSON et al., 2005; PIROMAL et al., 2008).

A detecção de focos de calor fornece informações sobre a distribuição espacial e temporal desses eventos, mas não a área realmente afetada pelas queimadas, que é uma

variável importante para quantificar a magnitude da queima de biomassa em escala global, através de dados oriundos de sensores remotos (GRÉGOIRE et al., 2003).

Vários trabalhos têm buscado usar diferentes algoritmos na estimativa de áreas queimadas e focos de calor em diferentes escalas. As diferenças nos resultados são marcantes, superiores a duas ordens de magnitude quanto a superfície estimada, bem como nos períodos de ocorrência (SETZER et al., 2007).

No âmbito nacional, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), desde a década de 1980, vem aprimorando um sistema de detecção de queimadas a partir de sensores a bordo de satélites (GONTIJO et al., 2011). Como resultado deste esforço, o INPE mantém um portal online, o qual inclui o monitoramento operacional de focos de queimada e de incêndios florestais detectados por satélites, bem como o cálculo e previsão do risco de fogo da vegetação. As informações são disponíveis cerca de 20 minutos após as passagens dos satélites (INPE, 2014).

1.1.4. O sensor MODIS

O sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) foi desenvolvido para promover o monitoramento da superfície terrestre, oceanos e atmosfera (JUSTICE et al., 1998). Este sensor foi lançado a bordo do satélite TERRA em dezembro de 1999, primeiro satélite do “*Earth Observing System*” (EOS), programa da NASA, e as coletas de dados iniciaram em fevereiro de 2000. Em maio de 2002, foi lançado um segundo satélite chamado de AQUA contendo o sensor MODIS (JUSTICE et al., 2002a).

Outros sensores além do MODIS estão a bordo do satélite TERRA: CERES, ASTER, MISR e MOPITT (LATORRE et al., 2003). O MODIS foi projetado, principalmente, para gerar dados que melhoram nossa compreensão da dinâmica global e os processos que ocorrem na terra, nos oceanos e na atmosfera. Além de fornecer bases para o desenvolvimento e validação de modelos capazes de prever mudanças globais com precisão suficiente, que, desta forma, podem ajudar nas tomadas de decisões (MODIS Website, 2013).

Os satélites TERRA e AQUA estão operando a uma órbita polar heliossíncrona, com altitude orbital média de 705 Km que alcança uma faixa de 2.330 Km de extensão, com resolução temporal de 1 – 2 dias. O cruzamento equatorial do satélite TERRA e do AQUA

é de aproximadamente às 10h30min e às 1h30min, respectivamente. As resoluções espaciais são de 250 m (bandas 1 – 2), 500 m (bandas 3 – 7) e 1000 m (bandas 8 – 36) (**Tabela 1.2**). Os instrumentos do MODIS têm alta sensibilidade de 12 bits - ou seja, as radiancia detectadas são quantificadas em classes dinâmicas, implicando em 4.096 níveis digitais (PIROMAL et al., 2008) -, em 36 bandas espectrais, onde os comprimentos de onda variam de 0,4 µm a 14,4 µm. Desta forma, as respostas obtidas são personalizadas para as necessidades individuais do usuário (MODIS website, 2013).

O sensor MODIS é um instrumento eletro-óptico de varredura mecânica (*Whiskbroom*) que utiliza o movimento do satélite para fornecer imageamento na direção do voo (*along track*). São imageados em cada banda, 10 fileiras de pixels para os detectores de 1 Km; 20 para os de 500 m; e 40 para os de 250 m de resolução espacial. Os detectores do MODIS divididos em quatro planos focais: Infravermelho Termal (LWIR – *Long Wave Infrared*), Infravermelho Médio (SWIR/MWIR – *Short/Medium Wave Infrared*); Infravermelho Próximo (NIR – *Near Infrared*) e Visível (VIS – *Visible*) (LATORRE et al., 2003).

As 36 bandas espectrais foram projetadas para evitar as bandas de absorção atmosférica e possibilitar a observação de propriedades das nuvens, dinâmica e propriedades da vegetação na superfície terrestre, e a temperatura da superfície dos oceanos (SOLOMONSON; TOLL, 1991; SOLOMONSON; BARKER, 1992). Algumas características principais do sensor MODIS são mostradas na **Tabela 1.2**.

Tabela 1.2 - Características gerais das bandas 1 a 36 do sensor MODIS.

Uso Primário	Banda	Largura da Banda (nm)	Radiância Espectral	Resolução Espacial
Superfície Terrestre/ nuvem/ aerossóis	1	620 - 670	21,8	250
				1000
				1000
				1000
	2	841 - 876	24,7	250
				1000
Propriedades da superfície/ nuvem	3	459 - 479	35,3	500
	4	545 - 565	29	500
	5	1230 - 1250	5,4	500
	6	1628 - 1652	7,3	500
	7	2105 - 2155	1	500

Continua...

Tabela 1.2 – Continuação...

Cor dos oceanos/ fitoplâncton/ bioquímica	8	405 - 420	44,9	1000
	9	438 - 448	41,9	1000
	10	483 - 493	32,1	1000
	11	526 - 536	27,9	1000
	12	546 - 556	21	1000
	13	662 - 672	9,5	1000
	14	673 - 683	8,7	1000
	15	743 - 753	10,2	1000
	16	862 - 877	6,2	1000
Vapor d'água Atmosférico	17	890 - 920	10	1000
	18	931 - 941	3,6	1000
	19	915 - 965	15	1000
Temperatura nuvens/ superfície	20	3660 - 3840	0,45	1000
	21	3929 - 3989	2,38	1000
	22	3929 - 3989	0,67	1000
	23	4020 - 4080	0,79	1000
Temperatura atmosférica	24	4433 - 4498	0,17	1000
	25	4482 - 4549	0,59	1000
Cirrus	26	1360 - 1390	6	1000
Vapor d'água	27	6535 - 6895	1,16	1000
	28	7175 - 7475	2,18	1000
	29	8400 - 8700	9,58	1000
Ozônio	30	9580 - 9880	3,69	1000
Temperatura nuvens/ superfície	31	10780 - 11280	9,55	1000
	32	11770 - 12270	8,94	1000
Altitude Topo da nuvem	33	13185 - 13485	4,52	1000
	34	13485 - 13785	3,76	1000
	35	13785 - 14085	3,11	1000
	36	14085 - 14385	2,08	1000

Fonte: Latorre et al. (2003)

1.1.4.1. Produtos MODIS

O EOS (*Earth Observing System*), fundado pelo programa da NASA, *Earth Science Enterprise* (ESE), tem três componentes principais: coordenar uma série de satélites para a observação da Terra; sistema avançado de dados designados para apoiar a produção, arquivamento e disseminação de dados oriundos dos satélites; e, desenvolvimento de algoritmos para a geração dos produtos específicos (JUSTICE et al., 2002b).

Existem vários produtos, gerados a partir do MODIS, que os cientistas usam para estudar as mudanças globais, além de suas aplicações práticas. Neste sentido, segundo Strahler et al. (1999), o objetivo dos produtos gerados, basicamente, é quantificar e

detectar as mudanças da cobertura terrestre, além dos processos naturais e antropomórficos, que, desta forma, auxiliam nos diversos modelos regionais e globais existentes.

Os produtos existentes para a superfície terrestre (**Tabela 1.3**), gerados pelo MODIS (MODLAND), estão no formato *Hierarchy Data Format* (HDF) para permitir maior transparência de acesso aos dados, através de um conjunto de ferramentas específicas (LATORRE et al., 2003). Deste modo, o principal objetivo é gerar informações, tanto para as ciências que estudam a mudança global, quanto gerar aplicações práticas (JUSTICE et al., 2002b).

Tabela 1.3 - Alguns produtos para a superfície terrestre gerados pelo sensor MODIS

Nome	Plataforma	Produtos	Resolução
MOD13Q1	Terra	Índice de vegetação	250 m
MOD09A1	Terra	Reflectância da superfície	500 m
MYD14A1	Aqua	Anomalias termais e fogo	1000 m
MOD14A1	Terra	Anomalias termais e fogo	1000 m
MYD12A2	Aqua	Anomalias termais e fogo	1000 m
MOD14A2	Terra	Anomalias termais e fogo	1000 m
MYD14	Aqua	Anomalias termais e fogo	1000 m
MYD13C2	Aqua	Índice de vegetação	5600 m
MOD13C3	Terra	Índice de vegetação	5600 m
MYD13C1	Aqua	Índice de vegetação	5600 m
MOD13C1	Terra	Índice de vegetação	5600 m
MYD13A3	Aqua	Índice de vegetação	1000 m
MOD13A3	Terra	Índice de vegetação	1000 m
MCD45A1	Combinado	Área queimada	500 m
MOD14	Terra	Anomalias termais e fogo	1000 m
MOD13A1	Terra	Índice de vegetação	500 m
MCD43A3	Combinado	Albedo	500 m

Fonte: MODIS website (https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table)

A seguir serão apresentados os principais produtos oriundos do sensor MODIS relacionados a detecção de focos de calor (registro instantâneo apenas da superfície com temperaturas elevadas devido à combustão) e detecção de áreas queimadas (extensão de vegetação destruída ou afetada pelo fogo):

1.1.4.2. Detecção de focos de incêndios (MOD14)

O MODIS *Thermal anomalies – Fires and Biomass Burning* (MOD14) diz respeito aos produtos de anomalias termais. O MOD14 inclui a ocorrência de incêndios (dia/noite), localização dos incêndios, os critérios utilizados para a seleção dos incêndios, cálculo de energia para cada incêndio detectado, além de composições de 8 e 30 dias de suas ocorrências (MODIS website, 2013). Segundo Justice et al. (2002b), este produto é o mais básico entre os produtos disponíveis para a detecção de fogo ativo e anomalias termais.

Os produtos do nível 2 incluem a ocorrência de anomalias termais agrupadas em diferentes classes de temperaturas, além de vários parâmetros relacionados ao fogo recuperados diariamente com resolução de 1 Km, baseada na energia emitida pela queimada (LATORRE et al., 2003).

A detecção de fogo ativo do MODIS é baseada em algoritmos desenvolvidos para o AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) e TRMM *Visible and Infrared scanner* VIRS. Esse algoritmo usa a temperatura do brilho derivado do MODIS canal 4 μm e 11 μm , denominado de T_4 e T_{11} , respectivamente. O algoritmo usa dois canais especiais para o fogo com 4 μm , chamados de canal 21 e 22. O canal 21 satura a aproximadamente 500°K e o canal 22 a aproximadamente 331°K. Uma vez que este canal de baixa saturação tenha menos ruído e possua erro de quantização menor, a T_4 é definida, sempre que possível. Por outro lado, quando o canal 22 satura, ou perde os dados, a T_4 , antes definida como canal de baixa saturação, passa a ser definida como canal de saturação mais elevada e o T_{11} é computado para 11 μm , canal 31, que satura a aproximadamente 400°K (LATORRE et al., 2003).

A banda do infravermelho próximo, com resolução de 250 m e 0,86 μm , é utilizada para identificar superfícies altamente reflectivas que são, provavelmente, as responsáveis dos alarmes falsos de queimadas (JUSTICE et al., 2002b).

A identificação de focos de incêndio baseia-se tanto na detecção absoluta, quanto na relativa das queimadas. Assim, algumas combinações de testes foram desenvolvidas por Justice et al. (2002b), de modo que, um pixel possa ser classificado como um incêndio durante o dia e durante a noite. Para evitar falsas detecções, todos os pixels em que $T_4 < 315 \text{ K}$ (305 K para noturno) ou $T_4 - T_{11} < 10 \text{ K}$ (3 K para noturno) ou $\rho_2 > 0,3$ (reflectância apenas para o dia) serão imediatamente eliminados como possíveis focos de incêndio.

Para a detecção absoluta de incêndios, o algoritmo requer que duas condições sejam satisfeitas:

- a) $T_4 > 360 \text{ K}$ (330 K para noturno)
- b) $T_4 > 330 \text{ K}$ (315 K para noturno) e $T_4 - T_{11} > 25 \text{ K}$ (10 K para noturno)

Para detecções relativas, caso os critérios relativos não sejam encontrados, o algoritmo acrescenta os valores médios mais 3 vezes o desvio padrão. Assim, para que um pixel seja classificado como queimada durante o dia, as seguintes condições precisam ser satisfeitas:

$$\{T_4 > \text{média}(T_4) + 3 \cdot \text{desvio padrão}(T_4) \text{ ou } T_4 > 330^\circ\text{K}\}$$

e

$$\{T_4 - T_{11} > \text{média}(T_4 - T_{11}) + 3 \cdot \text{desvio padrão}(T_4 - T_{11}) \text{ ou } T_4 - T_{11} > 25 \text{ K}\}$$

Para cálculos noturnos, tem-se

$$\{T_4 > \text{média}(T_4) + 3 \cdot \text{desvio padrão}(T_4) \text{ ou } T_4 > 315^\circ\text{K}\}$$

e

$$\{T_4 - T_{11} > \text{média}(T_4 - T_{11}) + 3 \cdot \text{desvio padrão}(T_4 - T_{11}) \text{ ou } T_4 - T_{11} > 10 \text{ K}\}$$

Finalmente, quando ocorrer à possibilidade de detecções falsas para observações durante o dia, o pixel é rejeitado se os canais do vermelho e do infravermelho próximo com resolução de 250 m apresentarem reflectância acima de 30% ou apresentar dentro de uma posição de 40° de reflexão especular (JUSTICE et al., 2002b).

1.1.4.3. Detecção de áreas queimadas (MCD45A1)

O produto MODIS MCD45A1 disponibilizado mensalmente, com nível 3 de processamento e resolução espacial de 500 m, oferece a informação da quantidade de área queimada, bem como a qualidade da informação disponibilizada para cada pixel. É produzido a partir dos dados de reflectância da superfície do sensor MODIS, abordo do satélite TERRA E AQUA, o algoritmo utilizado analisa a dinâmica diária de reflectância da superfície para localizar mudanças rápidas, em relação as mudanças espectrais, temporais e na estrutura da vegetação, assim consegue mapear a data aproximada da queima, além da extensão espacial (BOSCHETTI et al., 2013).

Esse produto está disponível no formato *Hierarchical Data Format* (HDF), formato pouco difundido e que agrega grande volume de informações e variados tipos de metadados, por isso, para ser utilizado os arquivos devem ser exportados para o formato *Geo-referenced Tagged Image File Format* (GeoTIFF). Para a conversão dos dados, existe a ferramenta *Modis Reprojection Tools* (MRT), que é oferecido pela *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LPDAAC). A instalação do programa exige que o usuário configure manualmente a interação entre o MRT e a ferramenta JAVA.

O produto disponibiliza oito subprodutos, detalhados a seguir (BOSCHETTI et al., 2013):

1. ***Burn date*** (2 bytes): Dias julianos aproximado da queima para oito dias antes de começar o mês e oito dias depois de terminar o mês. Os códigos indicam a situação do pixel.
 - 0 – não queimado
 - 1 – 366 – dia juliano da queima
 - 900 – neve ou aerossóis
 - 9998 – corpos d’água (continentais)
 - 9999 – corpos d’água (mares e oceanos)
 - 10000 – dados insuficientes
2. ***BA pixel QA*** (1 byte): Nível de confiança da detecção da queimada. Varia de 1 a 5, onde 1 são os *pixels* de confiança máxima, 4 são os *pixels* de confiança mínima e 5 são os *pixels* classificados como áreas queimadas, mas ocorrem sobre agricultura (com base no produto MCD12).
3. ***Number of Passes*** (1 byte): Número de observações quando passa pelo teste de consistência temporal.
4. ***Number Used*** (1 byte): Número de observações usado pelo teste de consistência.
5. ***Direction*** (1 byte): Direção no tempo em que a queimada foi detectada (frente, atrás ou os dois).
6. ***Surface Type*** (1 byte): Informações sobre o tipo de cobertura e suas propriedades.
7. ***Gap Range 1*** (2 bytes): Indica o maior período em que ficou nublado, ou seja, dificultou a identificação das áreas queimadas.

8. **Gap Range 2** (2 bytes): Indica o segundo maior período em que ficou nublado, ou seja, dificultou a identificação das áreas queimadas.

1.1.4.4. O algoritmo MCD45A1

O algoritmo do produto MCD45A1 baseia-se, sobretudo, na mudança espectrais, temporais e estruturais dos alvos. O algoritmo utiliza o modelo Função de Distribuição da Reflectância Bidirecional de Superfície (BRDF) para detectar, a partir de uma série diária de dados, a data aproximada de mudanças bruscas na cobertura da terra, por exemplo, queima de biomassa (BOSCHETTI et al., 2013).

Devido ao amplo campo de visada do sensor MODIS, existem variações da reflectância de superfície geradas pela variação nos ângulos de elevação solar e visada do satélite (dependência direcional da reflectância), assim a BRDF é utilizada para computar essas variações. A BRDF baseia-se em informações semi-físicas e é utilizada para prever mudanças na reflectância de superfície a partir do estado anterior (ROY et al., 2008; ROY et al., 2002; RIVEIRA-LOMBARDI, 2009). A partir de medidas estatísticas, é determinado se a diferença entre a reflectância prevista e observada é uma mudança de interesse significativo. Por exemplo, sombra e áreas queimadas têm respostas espectrais semelhantes, porém, áreas queimadas são mais persistentes em uma janela temporal, na ordem de alguns dias (BOSCHETTI et al., 2013).

Entretanto, é necessário ressaltar que a BRDF é utilizada pelo algoritmo MCD45 para observar as variações angulares encontradas nos dados MODIS e não para minimizar os efeitos da dependência direcional da reflectância (RIVEIRA-LOMBARDI, 2009).

A geração do produto MCD45 baseia-se na inversão do modelo linear de *kernels*, conhecido como *RossThick-LiSparseReciprocal* BRDF. No algoritmo essa inversão é feita para cada pixel geolocalizado das bandas 2 e 5, em um mínimo $m \geq 7$ observações da reflectância de superfície em uma janela temporal de $n \geq 16$ dias (BOSCHETTI et al., 2013). São definidas janelas de 16 dias, pois a observação do mesmo pixel, em iguais condições de geometria de iluminação e de visada do sensor, só ocorrem a cada 16 dias (RIVEIRA-LOMBARDI, 2009).

Após a reduções das variações oriundas da dependência direcional da reflectância através do modelo BRDF, calcula-se o Z-score (**Equação 1.1**), que é uma medida normalizada para estimar a probabilidade da nova observação pertencer ou não ao mesmo

conjunto utilizado pelo modelo BRDF invertido, ou seja, se realmente existem mudanças nas refletâncias de superfície (BOSCHETTI et al., 2013).

$$Z_{\lambda} = \frac{\rho_n(\lambda, \Omega, \Omega') - \rho(\lambda, \Omega, \Omega')}{\varepsilon} \quad (1.1)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\sigma_{\lambda}^2 + e^2 \frac{1}{w}} \quad (1.2)$$

Onde, Z_{λ} é o valor do Z-score, $\rho_n(\lambda, \Omega, \Omega')$ é o novo valor observado da reflectância; $\rho(\lambda, \Omega, \Omega')$ é o valor da reflectância predito pelo modelo em um dado comprimento de onda λ , computado pela inversão do modelo BRDF; Ω e Ω' são os ângulos de visada e iluminação dos novos valores de reflectância observado, respectivamente; ε é o erro do modelo BRDF; σ_{λ} é um valor fixo estimado do ruído em $\rho_n(\lambda, \Omega, \Omega')$; e é a raiz quadrada média dos resíduos do modelo BRDF invertido; e w é o peso determinado para $\rho_n(\lambda, \Omega, \Omega')$.

O Z-score é calculado para as bandas 2 e 5 do sensor MODIS, pois ambas as bandas são sensíveis à queima (BOSCHETTI et al, 2013). No entanto, a partir de operadores lógicos, os resultados são testados em relação a limiares espectrais definidos pelas características do ruído nas refletâncias observadas (Z_{limiar}), bem como pelas propriedades espectrais da vegetação afetada pelo fogo (λ_{banda7}).

Assim, as observações serão consideradas como candidatas a áreas queimadas se:

$$(Z_{banda2} < -Z_{limiar}) \text{ ou } (Z_{banda5} < -Z_{limiar})$$

Onde, Z_{banda2} e Z_{banda5} é o Z-score da banda 2 e 5; Z_{limiar} é um limiar de reflectância preestabelecido para um determinado comprimento de onda. Assim, valores acima do limiar estabelecido, não serão considerados candidatos a queimada. Valores negativos persistentes durante vários dias, $\rho_n(\lambda, \Omega, \Omega')$ menor que $\rho(\lambda, \Omega, \Omega')$, indicam que ocorreu uma queda nas refletâncias observadas das bandas 2 ou 5 em relação às refletâncias preditas, logo após a ocorrência do fogo. Enquanto que incrementos de reflectância resultam em valores positivos e estão associados a presença de nuvens, ruídos e outros (RIVEIRA-LOMBARDI, 2009).

Novas observações de reflectância também serão consideradas como candidatas a áreas queimadas, se:

$$\rho(\lambda_{banda5}, \Omega, \Omega') - \rho(\lambda_{banda7}, \Omega, \Omega') > \rho_n(\lambda_{banda5}, \Omega, \Omega') - \rho_n(\lambda_{banda7}, \Omega, \Omega')$$

e

$$\rho(\lambda_{banda2}, \Omega, \Omega') - \rho(\lambda_{banda7}, \Omega, \Omega') > \rho_n(\lambda_{banda2}, \Omega, \Omega') - \rho_n(\lambda_{banda7}, \Omega, \Omega')$$

Onde, $\rho_n(\lambda, \Omega, \Omega')$ é a nova reflectância observada e $\rho(\lambda, \Omega, \Omega')$ é o valor de reflectância predito a partir da BRDF invertido.

Segundo Zarco-Tejada et al. (2003), a banda 2 contribui com informações associadas às mudanças de conteúdo de água nas folhas, contrário com as bandas 5 e 7, devido aos maiores comprimentos de onda. Assim, segundo as condições citadas, as novas observações da reflectância serão consideradas candidatas a áreas queimadas se as diferenças entre reflectância dos valores observados e preditos, obtidos a partir da banda 2 e 5, resultarem em um decréscimo em relação a banda 7 (RIVEIRA-LOMBARDI, 2009).

1.1.5. Imagens de satélite LANDSAT 5 TM

O primeiro satélite da série LANDSAT foi lançado em 23 de julho de 1972 pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) com o nome de ERTS 1 (*Earth Resources Technology Satellites*), o qual fora posteriormente rebatizado para LANDSAT. A primeira geração do programa é composta de 3 satélites, LANDSAT 1, 2 e 3 com dois instrumentos: RBV (*Return Beam Vidicon*), pouco utilizado, e o MSS (*Multispectral Scanner*). A segunda geração do programa fora iniciada em 1982 com o lançamento do LANDSAT 4, que possuía o instrumento *Thematic Mapper* (TM) e o MSS (ENGESAT, 2013).

O sensor TM a bordo do satélite LANDSAT 5, que foi lançado em março de 1984 e desativado em junho de 2013. Cada imagem abrange uma área de 185 x 185 Km, com resolução espacial de 30 m, para as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, e 120 m, para a banda 6. O satélite LANDSAT 5 revisita a mesma área a cada 16 dias. (INPE, 2013). O sensor TM opera com sete (7) bandas espectrais nas regiões do visível, infravermelho próximo, médio e termal (**Tabela 1.4**).

Tabela 1.4 - Características e aplicações das bandas TM e ETM dos satélites LANDSAT 5 e 7.

Banda	Intervalo espectral (µm)	Características e aplicações
1	(0,45 - 0,52)	Apresenta grande penetração em corpos de água, com elevada transparência, permitindo estudos batimétricos. Sofre absorção pela clorofila e pigmentos fotossintéticos auxiliares.
2	(0,52 - 0,60)	Apresenta grande sensibilidade à presença de sedimentos em suspensão, possibilitando sua análise em termos de quantidade e qualidade. Boa penetração em corpos de água.
3	(0,63 - 0,69)	A vegetação verde, densa e uniforme, apresenta grande absorção, ficando escura, permitindo bom contraste entre as áreas ocupadas com vegetação (ex.: solo exposto, estradas e áreas urbanas). Apresenta bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal (ex.: campo, cerrado e floresta). É a banda mais utilizada para delimitar a mancha urbana, incluindo identificação de novos loteamentos. Permite a identificação de áreas agrícolas.
4	(0,76 - 0,90)	A vegetação verde, densa e uniforme, reflete muita energia nesta banda, aparecendo bem clara nas imagens. Apresenta sensibilidade à rugosidade da copa das florestas (dossel florestal). Serve para mapear áreas ocupadas com vegetação que foram queimadas.
5	(1,55 - 1,75)	Apresenta sensibilidade ao teor de umidade das plantas, servindo para observar estresse na vegetação, causado por desequilíbrio hídrico.
6	(10,4 - 12,5)	Apresenta sensibilidade aos fenômenos relativos aos contrastes térmicos, servindo para detectar propriedades termais de rochas, solos, vegetação e água.
7	(2,08 - 2,35)	Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo obter informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia.

Fonte: Adaptação INPE (2013).

1.1.6. Análise espacial de dados geográficos

Todos os eventos espaciais e temporais ocorrem em algum lugar e em algum momento (HAINING, 2003). Desta forma, compreender a distribuição espacial destes eventos, através da mensuração de propriedades e relacionamentos, levando em conta a localização espacial do fenômeno, constituiu um desafio para elucidação de questões importantes em muitas áreas do conhecimento (DRUCK et al., 2004).

Existem três abordagens mais utilizadas para caracterizar os problemas de análise espacial, a saber: eventos ou padrões pontuais, superfícies contínuas (estimadas com base em um conjunto de amostras regularmente ou irregularmente distribuídas) e áreas com

contagem e taxas agregadas (dados associados a levantamentos populacionais) (DRUCK et al., 2004; ANDERSEN, 1992).

A análise da distribuição espacial de pontos, busca testar hipóteses sobre o padrão observado, ou seja, se o padrão é inteiramente aleatório, aglomerado ou regularmente distribuídos (DRUCK et al., 2004; LIU et al., 2010).

1.1.6.1. Função K de Ripley

A função K de Ripley, também conhecida como medida de *momento de segunda ordem reduzido* (DRUCK et al., 2004), é uma ferramenta que pode ser utilizada para resumir o padrão de distribuição de eventos, testar hipóteses sobre esse padrão, estimar parâmetros e ajustar modelos (DIXON, 2002).

$$\hat{K}(h) = \hat{\lambda}^{-1} E[n^{\circ} \text{ de pontos a uma distância } h \text{ de um ponto arbitrário}] \quad (1.3)$$

Onde, $E[\]$ é um operador de esperança matemática e $\hat{\lambda}$ é uma medida de primeira ordem que representa a intensidade ou número médio de eventos por unidade de área com raio h . A estimativa de K é calculada em função de um raio “ h ” e é resultante da intensidade de eventos que ocorrem nessa área definida. Segundo Druck et al. (2004), o estimador \hat{K} pode ser representado pela fórmula (**Equação 1.4**):

$$\hat{K}(h) = \frac{A}{N^2} \sum_i^N \sum_{j, i \neq j}^N \frac{I_h(d_{ij})}{w_{ij}} \quad (1.4)$$

Onde, A é a área da região considerada a um raio h , N é o número de eventos observados, $I_h(d_{ij})$ é uma função indicatriz cujo o valor é 1 se $(d_{ij}) \leq h$ e 0 caso contrário, d_{ij} é a distância entre o i -ésimo e o j -ésimo ponto, e w_{ij} é a proporção da circunferência do círculo centrado no evento i que está dentro da região.

Segundo Druck et al. (2004), os pontos próximos ao limite da área de estudo influenciam a estimativa de intensidade de eventos, chamado efeito de borda. Assim, alguma correção deve ser utilizada para que as estimativas não sejam influenciadas pelo fato de não ocorrerem mais eventos observáveis fora do limite da região de estudo. Uma correção, proposta por Ripley (1977), verifica se o limite da área de estudo está próximo do evento. O estimador da função K com a correção pode ser representada por:

$$\hat{K}(h) = \hat{\lambda}^{-1} N^{-1} \sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i}^N w(l_i, l_j)^{-1} I(d_{ij} < h) \quad (1.5)$$

Onde, $\hat{\lambda}$ é a intensidade de eventos por unidade de área; h o raio centrado em cada evento; N é o número de pontos contidos em uma área de raio h ; $w(l_i, l_j)^{-1}$ é uma função de correção de borda; d_{ij} é a distância entre o i -ésimo e j -ésimo ponto; e I é uma função indicatriz que assume o valor 1 (um) sem que a condição $d_{ij} < h$ for verdadeira e 0 (zero) caso contrário.

Uma forma de comparar a estimativa K de um conjunto de dados observados com πh^2 e facilitar a interpretação gráfica é a utilização da função transformada $\hat{L}(h)$, definida como (**Equação 1.6**):

$$\hat{L}(h) = \sqrt{\frac{\hat{K}(h)}{\pi}} - h \quad (1.6)$$

O gráfico de $\hat{L}(h)$, em função da distância h , indica uma atração espacial, ou agrupamento, entre os eventos com valores positivos, ou seja, se todos os valores observados de $\hat{L}(h)$ estiverem acima do intervalo de confiança (envelopes) e forem positivos, o agrupamento está em toda a escala considerada no estudo. Os valores negativos indicam uma repulsão espacial (regularidade) entre os eventos na escala, assim, estimativas negativas que estiverem abaixo do intervalo de confiança inferior, apresentam regularidade em toda a escala. Valores dentro do intervalo de confiança são considerados aleatórios (PEREIRA et al., 2013).

1.1.6.2. Estimador de Densidade Kernel

É comum o uso de estimadores de densidade para analisar as propriedades de uma série de dados. Essas estimativas podem indicar características importantes, como assimetria e multimodalidade dos dados. Em alguns casos podem apontar caminhos para mais investigações (SILVERMAN, 1986). O estimador de densidade Kernel é um método estatístico não paramétrico e tem diversas aplicações práticas, atualmente tem sido muito utilizado para mapear ocorrências de incêndios (DE LA RIVA et al., 2004).

Matematicamente, o estimador de densidade Kernel é definido como (SILVERMAN, 1986):

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh^2} \sum_{i=1}^n K \left\{ \frac{x - X_i}{h} \right\} \quad (1.7)$$

Onde, n é o número de pontos observados; h é a largura de banda; K é a função Kernel; x é o vetor de coordenada que representa a localização do ponto estimado; e X_i é o vetor da i -ésima coordenada que representa cada ponto observado em relação ao estimado.

De acordo com Druck et al. (2004), a análise do comportamento espacial dos eventos deve começar pela estimativa da intensidade de ocorrência do processo pontual em toda a área de interesse, o qual é muito útil para fornecer uma visão geral da distribuição espacial dos eventos considerados. A forma mais simples é o ajuste de uma função bidimensional aos eventos considerados na análise, que realiza uma contagem de todos os eventos dentro de uma região de influência (largura de banda), ponderando-os pela distância de cada evento até o ponto que está sendo estimado (**Figura 1.6**).

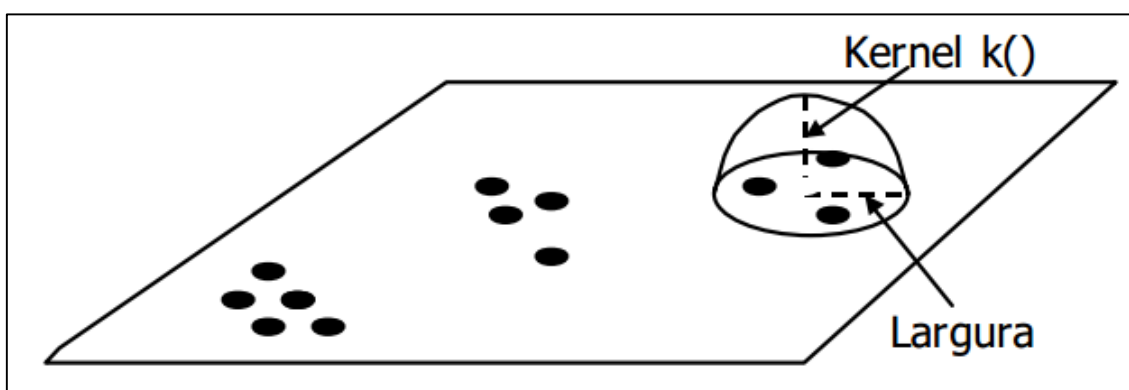


Figura 1.6 - Estimador de densidade Kernel.

Fonte: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/cap2-eventos.pdf>

O estimador Kernel, tem dois parâmetros básicos (DRUCK et al., 2004):

- O raio de influência, usualmente denominado de largura de banda ($h \geq 0$), define a vizinhança do ponto a ser interpolado e controla o grau de “alisamento” da superfície resultante;
- Uma função de estimação com propriedades de suavização do fenômeno.

Usualmente, diversas funções podem ser utilizadas para interpolar $K(\cdot)$, por exemplo, a função quadrática descrita por Silverman (1986), expressa como:

$$K(x) = \begin{cases} 3\pi^{-1}(1 - x^T x)^2 & \text{se } x^T x < 1 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1.8)$$

Onde, x é o conjunto de dados multivariados cuja densidade será estimada. O estimador Kernel pode produzir uma boa representação visual dos eventos analisados, porém, essa representação depende da largura de banda (h) utilizada. Os valores de h dependem da escala adotada no estudo e das características específicas do padrão espacial do evento analisado. Vários métodos foram testados para definir o valor apropriado para ser adotado no estimador Kernel (DE LA RIVA et al., 2004).

1.1.7. Modelo probabilístico espacial

O modelo linear probabilístico, chamado *Probit*, descreve o comportamento da variável dependente dicotômica em termos de uma regressão linear sobre variáveis explicativas não-aleatórias contidas em um vetor (BAUMANN; CARNEIRO, 2002), através de uma função de distribuição acumulada normal (GUJARATI; PORTER, 2011). Em muitos casos, a informação relevante pode ser capturada pela definição de uma variável binária (chamadas de variáveis *dummy*), isto é, uma variável que possa ser representada por zero ou um (WOOLDRIDGE, 2010).

De acordo com Wooldridge (2010), o modelo linear de probabilidade é simples de usar e estimar, mas apresenta algumas limitações: as probabilidades ajustadas podem ser menores que zero (0) ou maiores que um (1) e os efeitos da variável explicativa é constante. Porém, essas limitações podem ser superadas utilizando modelos de resposta binária. O modelo linear de probabilidade pode ser definido como:

$$P(y = 1|x) = G(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k) = G(\beta_0 + x\beta) \quad 0 < G(z) < 1 \quad (1.9)$$

Em que x é usado para representar o conjunto completo de variáveis explicativas. No modelo *Probit*, G é uma função de distribuição cumulativa (fdc) normal padrão, expressa pela integral:

$$G(z) = \Phi(z) \equiv \int_{-\infty}^z \phi(v)dv \quad (1.10)$$

Onde, a densidade normal padrão é definida por:

$$\phi(z) = (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \exp(-z^2/2) \quad (1.11)$$

O modelo *Probit* pode ser derivado a partir de um *modelo de variável latente* subjacente que satisfaça os pressupostos do modelo linear clássico. Assim, sendo determinado como:

$$y^* = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad y = 1[y^* > 0] \quad (1.12)$$

Onde, y^* é uma variável latente não observada que satisfaça a distribuição normal e de homocedasticidade com uma média linear; x é um vetor de variáveis independentes; β são coeficientes desconhecidos; e assumimos que ε é independente de x e tem distribuição logística padrão ou distribuição normal padrão. Assim, a *função indicadora* requer que os valores observados sejam considerados um (1) se o evento considerado é verdadeiro, ou seja, ocorre, e zero (0) caso contrário. Portanto:

$$y = 1 \text{ se } y^* > 0, \text{ e}$$

$$y = 0 \text{ se } y^* \leq 0.$$

Finalmente, com base na **Equação 1.12** e nas hipóteses supracitadas, podemos definir a probabilidade de resposta de y , isto é, a probabilidade de ocorrência de determinado evento, de acordo com a seguinte equação:

$$P(y = 1|x) = P(y^* > 0|x) = P[\varepsilon > -(\beta_0 + x\beta)|x] = 1 - G[-(\beta_0 + x\beta)] \\ = G(\beta_0 + x\beta) \quad (1.13)$$

Onde, $G(\beta_0 + x\beta)$ retorna a $\Phi(.)$ que é a função de distribuição cumulativa (fdc) normal padrão; x é o vetor de variáveis independentes; e β é o vetor de coeficientes desconhecidos.

Em muitas aplicações de modelos de resposta binária, o objetivo principal é explicar os efeitos de x_j sobre a probabilidade de resposta $P(y = 1|x)$. Entretanto, raramente a variável latente y^* tem uma unidade de medida bem definida, assim, as magnitudes de cada β_j não serão de grande importância. Além do mais, é importante ressaltar que o modelo de probabilidade linear aceita o uso de diversas variáveis *dummy* (resposta binária) independentes na mesma equação, bem como variáveis quantitativas (WOOLDRIDGE, 2010).

CAPÍTULO II: MAPEAMENTO TEMPORAL E VALIDAÇÃO DE ÁREAS QUEIMADAS POR MEIO DO PRODUTO MODIS MCD45A1 PARA O BIOMA PANTANAL

2.1. INTRODUÇÃO

O regime de incêndios, antes esporádicos, vêm tornando-se cada vez mais frequentes. O que causa danos significativos ao solo e a atmosfera, pois a queima da biomassa vegetal é uma das principais fontes responsáveis pelo lançamento de gases do efeito estufa e partículas aerossóis, com influência na química da atmosfera, nas propriedades das nuvens e no saldo da radiação (KAUFMAN et al., 1998; BOSCHETTI et al., 2013; GRÉGORIE et al., 2003).

A prática de uso do fogo para auxílio em determinadas atividades antrópicas, sobretudo como atividade agrícola e pecuária, é antiga e está bastante consolidada, principalmente em regiões caracterizadas por estações secas pronunciadas. No Pantanal, é comum a prática da queimada de forma controlada e localizada, com o objetivo de reduzir ou conter a expansão de espécies indesejáveis. Porém a ocorrência da queima por vários anos em uma mesma área provoca elevada redução da biomassa aérea, degradação físico-química e biológica do solo (CARDOSO; CRISPIM, 2001; RODRIGUES et al., 2002).

Neste sentido, o monitoramento dos eventos de queimadas, a partir de um conjunto de dados confiáveis, é necessário para auxiliar na compreensão da dinâmica do uso e cobertura da terra, de tal forma que forneça informações para subsidiar programas ambientais, bem como contribuir para os estudos de mudanças climáticas (CARDOZO et al., 2011).

Dados oriundos de satélites têm sido bastante utilizados nos últimos anos para a detecção de incêndios ativos, focos de calor, e para o mapeamento de áreas queimadas (ROY et al., 2002). Dentre eles, destaca-se o sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) que foi desenvolvido para promover o monitoramento da superfície terrestre, dos oceanos e da atmosfera (JUSTICE et al., 1998). Este sensor foi lançado a bordo do satélite TERRA em dezembro de 1999, primeiro satélite desenvolvido pelo programa “*Earth Observing System*” (EOS), da NASA. As coletas de dados iniciaram em fevereiro de 2000 e em maio de 2002, foi lançado o segundo satélite chamado de AQUA contendo também o sensor MODIS. (JUSTICE et al., 2002a).

Existem vários produtos, gerados a partir do sensor MODIS, onde o objetivo, basicamente, é quantificar e detectar as mudanças da cobertura terrestre, além dos processos naturais e antropomórficos que, desta forma, auxiliam nos diversos modelos regionais e globais existentes (STRAHLER et al., 1999).

O produto MODIS MCD45A1 oferece a informação da quantidade de área queimada, baseada em pixels. Produzido a partir dos dados de reflectância da superfície do sensor MODIS, a bordo do satélite TERRA e AQUA. O algoritmo utilizado analisa a dinâmica diária de reflectância da superfície para localizar mudanças rápidas, assim consegue mapear a data aproximada da queima, além da extensão espacial.

Diversos trabalhos têm procurado avaliar a exatidão das estimativas de área queimada por meio do produto MCD45A1. Boschetti et al. (2010), avaliando a exatidão global das estimativas temporais do produto MODIS, concluíram que a diferença média de tempo entre o produto área queimada do MODIS (MCD45A1) e o produto de focos ativos (MYD14A1) é de 1 dia e a maioria das áreas queimadas foram detectadas próximas a detecção de um foco de calor: 50% em um único dia e 75% em 4 dias. Ou seja, os usuários do produto MODIS de áreas queimada devem estar cientes dessa diferença.

O objetivo do presente capítulo foi mapear áreas queimadas no bioma Pantanal por meio do produto MODIS MCD45A1, entre 2003 e 2013, bem como validar o potencial do produto em detectar áreas queimadas nesse bioma.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. Área de estudo

A área de estudo corresponde ao bioma Pantanal que cobre aproximadamente 150.355 Km² (IBGE, 2004) e está localizado entre os paralelos 15° e 22° de longitude sul e entre os meridianos 55° e 59° de longitude oeste. A definição mais detalhada da área de estudo encontra-se no “Mapa de Biomas do Brasil; primeira aproximação”, na escala 1:5.000.000, publicado pelo IBGE (2004). De modo geral, o Pantanal é a ligação entre o Cerrado (Brasil Central), o Chaco (Bolívia) e a região Amazônica (Região Norte). Por ser uma área de transição e uma das maiores planícies sedimentar do mundo, a região é formada por uma variedade de ecossistemas que são periodicamente inundados (IBGE, 2014). Informações mais detalhadas encontram-se no Referencial Teórico desde manuscrito.

2.2.2. Etapas do trabalho

O presente trabalho foi desenvolvido em três etapas distintas: a primeira etapa consistiu na aquisição e processamento dos dados do produto MCD45A1 para o mês de setembro de 2003 a 2013, segundo a metodologia apresentada por Araújo e Júnior (2011) e Boschetti et al. (2013); a segunda etapa consistiu na validação dos dados de áreas queimadas discriminadas pelo produto MCD45A1, a partir de imagens LANDSAT TM; e, finalmente, a terceira etapa consistiu na quantificação das áreas queimadas anualmente no bioma Pantanal, análise de recorrência das queimadas e avaliação do tipo de vegetação atingida.

2.2.2.1. Mapeamento das áreas queimadas

O produto MODIS MCD45A1 foi adquirido pelo site do Serviço Geológico Americano (USGS), <http://earthexplorer.usgs.gov/>, o qual é mensalmente disponibilizado a nível 3 de processamento e resolução espacial de 500 m. Para abranger o território do bioma Pantanal, foram necessárias 2 *tiles* MODIS MCD45A1: h12v10 e h12v11 (**Figura 2.1**).



Figura 2.1 - Localização das cenas MODIS.

O produto disponibiliza oito subprodutos, mas para essa análise foram utilizados apenas dois: *ba_qa*, índice de confiabilidade do pixel rotulado como queimada; *burndate*, detecção de área rotulada como queimada. Esse produto está disponível no formato *Hierarchical Data Format* (HDF), por isso, para ser utilizado os arquivos foram exportados para o formato *Geo-referenced Tagged Image File Format* (GeoTIFF).

Para a conversão dos dados foi utilizada a ferramenta *Modis Reprojection Tools* (MRT), que é oferecida pela *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LPDAAC). Além de convertidos para *GeoTIFF*, os produtos foram convertidos para o sistema de coordenadas geográficas, *datum* WGS84.

No software ArcGIS 10 filtrou-se os dados, isto é, a partir dos pixels rotulados como áreas queimadas no *burndate* (valores de 1 a 366, dias julianos) obteve-se somente os pixels com alto índice de confiabilidade, valor 1, conforme a banda *ba_qa*. Para isso, utilizou-se o cruzamento das duas bandas através da ferramenta *Raster Calculator* (BOSCHETTI et al., 2013).

O mapeamento foi realizado para o mês de setembro de cada ano, pois neste mês registrou-se mais números de focos de calor no estado de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul (compõe o bioma Pantanal) no período de 2003 a 2013.

2.2.2.2. Avaliação de acurácia do mapeamento

Para validar o produto MCD45A1 utilizou-se a cena 226/72 do satélite LANDSAT TM, obtida em 18/09/2007, ano base escolhido para validação do produto, uma vez que neste ano observou-se grande quantidade de queimadas no bioma e melhor qualidade da cena disponível para a região (sem nuvens, por exemplo). A classificação utilizada foi a supervisionada pelo método paralelepípedo.

Assim, os resultados obtidos a partir da classificação foram utilizados como verdade terrestre, por possuir melhor resolução espacial, isto é, foram usados como referência para a validação do produto MCD45A1, em 2007.

Ressalta-se que para evitar a superestimativa dos resultados foi preciso filtrar as áreas queimadas do produto, obtendo, assim, somente as áreas queimadas anteriores a data da imagem LANDSAT TM, pois o produto disponibiliza dados de áreas queimadas para todo o mês.

Para avaliar a acurácia dos resultados foi utilizado o método da matriz de confusão (FOODY, 2002), precisão global e o índice Kappa, a partir da aleatorização de 300 pontos

na cena LANDSAT TM, de forma que a distribuição desses pontos contemplasse toda cena (**Figura 2.2**). Posteriormente esses pontos foram avaliados se coincidiam ou não com a classificação realizada e o produto MCD45A1.

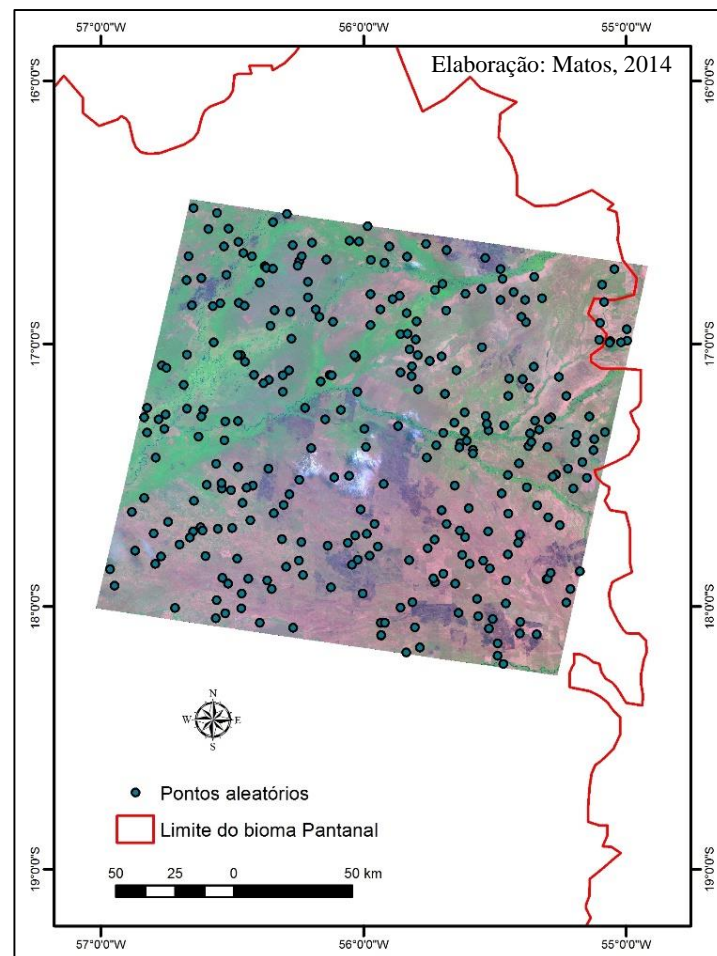


Figura 2.2 – Visão geral dos pontos sorteados aleatoriamente sobre a imagem LANDSAT TM cena 226/72 (RGB 5/4/3).

Vale ressaltar que a avaliação de acurácia de uma classificação, depende de uma série de fatores, tais como: complexidade do terreno, as resoluções espaciais e espectrais do sensor, o algoritmo utilizado para a classificação, as classes escolhidas no processo de classificação e o conjunto de dados que representa a verdade do terreno (MENESES; SANO, 2012).

Esta avaliação se expressa em termos de índices que são calculados a partir de matrizes de erros, que avaliam a concordância entre a classificação da imagem e o conjunto de amostras de referência. Através desta matriz de erros é possível verificar a quantidade de erro de exclusão (omissão) e erro de inclusão (comissão) de cada classe.

Outra medida usual é a acurácia do produtor e do usuário, que também é uma maneira de representar a acurácia de uma classificação. A acurácia do produtor refere-se às amostras que não foram classificadas corretamente, ou seja, sendo omitidas de sua categoria correta. E a acurácia do usuário indica a probabilidade que um pixel classificado de fato pertença aquela categoria na realidade (FIGUEIREDO; VIEIRA, 2007).

A partir da matriz de confusão é possível obter medidas descritivas, como por exemplo a de exatidão global, que nada mais é do que a razão entre o número total de pontos classificados corretamente e o número total de pontos de validação (MENESES; SANO, 2012).

O índice Kappa é uma técnica multivariada discreta muito utilizada para avaliar a acurácia temática, utilizando todos os elementos da matriz de confusão no cálculo. É uma medida do quanto à classificação está de acordo com os dados utilizados como referência (FIGUEIREDO; VIEIRA, 2007). Este índice varia de 0 (concordância nula) e 1 (concordância perfeita) (MENESES; SANO, 2012).

$$K = \frac{\sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}} \quad (2.1)$$

Onde, x_{ii} é o valor na linha i e coluna i ; x_{i+} é a soma da linha i e x_{+i} é a soma da coluna i da matriz de confusão; n é o número total de amostras e c o número total de classe.

2.2.2.3. Quantificação e recorrência das áreas queimadas

Após o mapeamento e avaliação de acurácia dos dados, quantificou-se anualmente o total de áreas queimadas por meio do ArcGIS 10.

Primeiro, os arquivos matriciais foram convertidos para dados vetoriais em formato polígono e transformado para sistema de coordenadas projetadas (UTM). Os polígonos correspondentes às áreas queimadas foram extraídos e posteriormente suas áreas foram calculadas.

A partir dos dados do levantamento florístico do Projeto PROBIO-Pantanal (MMA, 2014), foi feito um cruzamento dos dados, por meio da ferramenta *Intersect*, disponível no ArcGIS 10, com o objetivo de quantificar a ocorrência de áreas queimadas por tipo de vegetação. Para facilitar e simplificar a caracterização, os dados do tipo de vegetação foram agrupados em: Área antrópica (Agricultura e Pastagem), Floresta Estacional Decidual, Floresta Estacional Semi-decidual, Formação pioneira (incluindo as áreas de

tensão ecológica), Refúgios Vegetacionais, Savana-Cerrado, Savana-Estépica e Vegetação secundária.

A recorrência anual das queimadas durante o período analisado foi obtida através da interseção, ano a ano, dos pixels classificados como queimada pelo produto MODIS MCD45A1. Para isso, primeiramente, produziu-se uma sequência binária para cada ano, ou seja, zero (0) quando não queimada e um (1) quando queimada. Posteriormente, foi realizada uma álgebra de mapas, através da ferramenta *Raster Calculator*, do software ArcGIS 10, isto é, foi realizada uma soma da interseção pixel a pixel de todos os anos.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na **Figura 2.3** é possível observar as cicatrizes de áreas queimadas na cena (226/72) utilizada para a validação (a); o mapeamento realizado a partir da classificação supervisionada, considerada como verdade terrestre, por apresentar melhor resolução espacial (b); e as áreas queimadas obtidas do produto MCD45A1 (c).

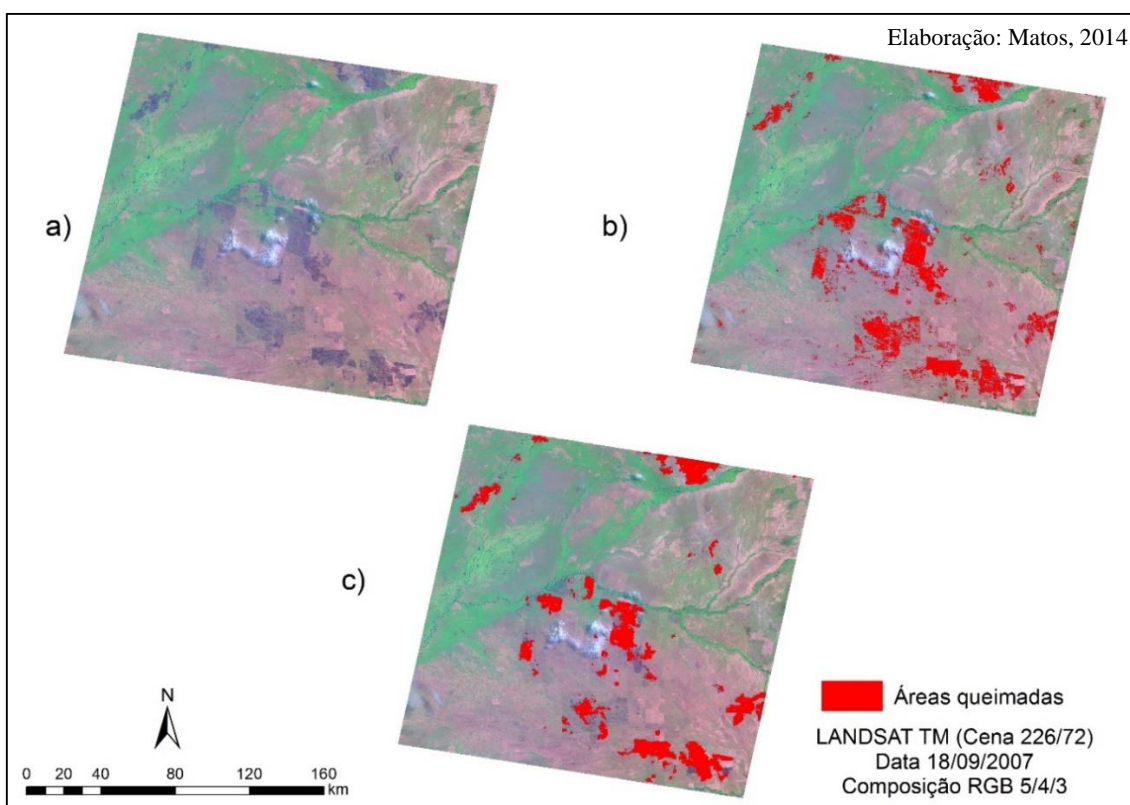


Figura 2.3 - Cena LANDSAT TM utilizada para a validação do produto. Em (a) observa-se as áreas queimadas escuras na cena; em (b) os polígonos em vermelho correspondem às áreas queimadas mapeadas pela classificação supervisionada da imagem; e em (c) observa-se polígonos em vermelho obtidos do produto MCD45A1.

Ainda em relação a **Figura 2.3**, é possível observar que existem mais áreas queimadas obtidas pela classificação, se comparado com o produto MCD45A1. Esse fato, que é esperado, se deve a limitação da resolução espacial do sensor MODIS.

Na **Figura 2.4** é possível observar que as áreas queimadas discriminadas pelo produto são de grandes extensões e melhor delimitadas em vegetação natural. Porém, nas áreas com cobertura antrópica, agricultura e pastagem, as queimadas apresentam extensões limitadas, resultando em maior fragmentação das áreas detectadas.

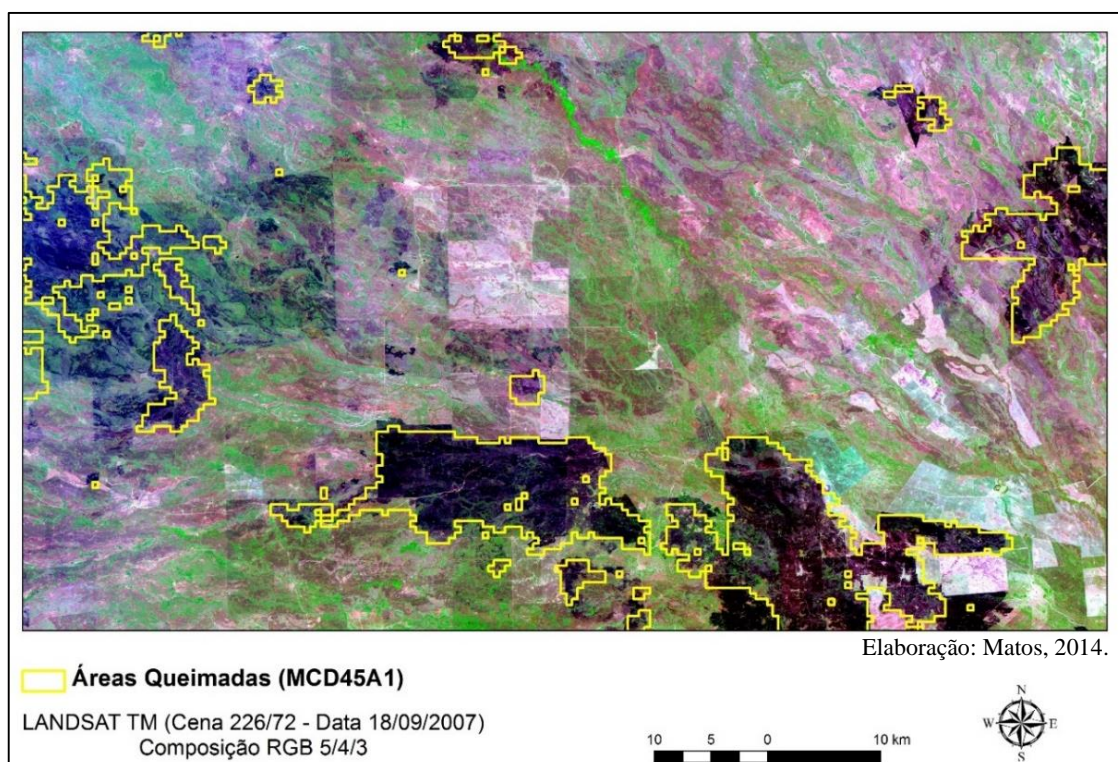


Figura 2.4 - Visão geral das áreas queimadas obtidas pelo produto MCD45A1 em relação à cena LANDSAT TM.

Araújo e Júnior (2011), alegam que o melhor delineamento das queimadas discriminadas pelo produto MCD45A1 em áreas com vegetação natural, se deve à extensão contínua das áreas naturais, além da grande quantidade de material vegetal combustível, principalmente em época de seca. Porém, as queimadas localizadas em áreas antrópicas são menores.

Após a classificação da imagem LANDSAT TM e aleatorização dos pontos de averiguação foi possível obter a matriz de confusão, sendo esta apresentada na **Tabela 2.1**.

Tabela 2.1 - Matriz de confusão, acurácia do produtor e do usuário em relação as áreas queimadas e não queimadas do produto MCD45A1 e LANDSAT TM.

		Produto MCD45A1		Total	AP (%)
Verdade		0	1		
	0	275	5	280	98
	1	8	12	20	60
Total		283	17	300	
AU (%)		97	71		EG = 96%

Em que: AU = Acurácia do usuário; AP = Acurácia do produtor; EG = Exatidão global; 0 = Não queimado; 1 = Queimado.

Diante dos dados apresentados na **Tabela 2.1** foi possível verificar que a exatidão global da classificação foi de 96%. Segundo Figueiredo e Vieira (2007), a matriz de confusão fornece a base para descrever a acurácia da classificação e caracterizar os erros, ajudando a refinar a classificação.

Entretanto, embora a exatidão global tenha dado resultado satisfatório na classificação é necessário verificar se, em cada classe mapeada (queimada e não queimada), houve erros de inclusão (comissão) e erros de exclusão (omissão). Dessa forma, segundo Foody (2002), é necessário utilizar o índice Kappa, que leva em consideração toda a matriz de confusão no seu cálculo. O valor encontrado para o índice Kappa foi de 0,64, considerado com sendo muito bom, segundo a qualidade da classificação proposta por Landis e Koch (1977). Ou seja, essa medida, que varia de 0 (concordância nula) a 1 (concordância perfeita), indica o quanto da classificação está de acordo com os dados de referência.

Ainda em observação a **Tabela 2.1** nota-se que a acurácia do usuário foi de 97% para a classe não queimada. Essa percentagem significa que dos 283 pontos classificados no produto MCD45A1 como área não queimada, 97% deles (275), realmente não eram áreas queimadas na imagem LANDSAT TM.

Para as áreas queimadas a acurácia do usuário foi de 71%, ou seja, dos 17 pontos locados aleatoriamente como áreas queimadas, cinco (5) não foram corretamente

classificados. Em resumo, os erros de inclusão foram de, respectivamente para áreas não queimadas e queimadas, 3% e 29%.

Para as áreas não queimadas, a acurácia do produtor foi de 98%, ou seja, dos 280 pontos alocados aleatoriamente, 275 pontos foram classificados corretamente. A acurácia do produtor para as áreas queimadas foi de 60%, isto é, dos 20 pontos localizados em áreas queimadas, apenas oito (8) não foram corretamente classificados. Assim, os erros de exclusão para as áreas não queimadas e queimadas foram de 2% e 40%, respectivamente.

No caso da determinação da extensão das áreas queimadas, os erros dificilmente serão menores que 20% e podem ser atribuídos à falta de dados no momento de ocorrência de uma queimada, incompatibilidade da resolução espacial, pois a maioria das queimadas que ocorrem no Brasil são menores que a resolução espacial do sensor (500 m), assinatura espectral das áreas queimadas não se destacarem tanto, queima parcial da vegetação e limitação técnicas apresentadas pelo sensor MODIS (SETZER et al., 2007). Roy e Boschetti (2009), compararam três produtos de sensoriamento remoto (MODIS, L3JRC e GlobCarbon) para detecção de áreas queimadas no continente africano e concluíram que o produto MODIS apresentou maior acurácia no mapeamento, devido a fatores como precisa calibração, geolocalização, correção atmosférica, mascaramento de nuvens e resolução espacial de 500 m.

Araújo e Júnior (2011), validaram a qualidade da área queimada mapeado pelo mesmo produto, no bioma Cerrado, a partir de imagens de satélite LANDSAT TM e concluíram que, devido, a sua alta acuidade, o produto mostrou-se importante para o monitoramento de áreas queimadas no bioma Cerrado.

Cardozo et al. (2011), também avaliaram o mesmo produto, a partir de áreas queimadas mapeadas pelo Modelo de Mistura Espectral (MLME) em imagens de reflectância da superfície (MOD09GA) e imagens LANDSAT TM no Estado de Rondônia e concluíram que o produto não se mostrou eficiente para a detecção, atribuindo tais omissões à interferência da profundidade espacial incompatível.

De acordo com o mapeamento realizado com o produto MCD45A1, no período de estudo, o ano que mais apresentou áreas queimadas foi 2005, com 8.559 Km², seguido dos anos 2007 e 2004, com 8.241 Km² e 7.603 Km², ou seja, 5,66%, 5,45% e 5,03% da

área total do bioma Pantanal, respectivamente (**Figura 2.5**). Os mapas anuais das áreas queimadas, encontram-se no **Apêndice A**, deste trabalho.

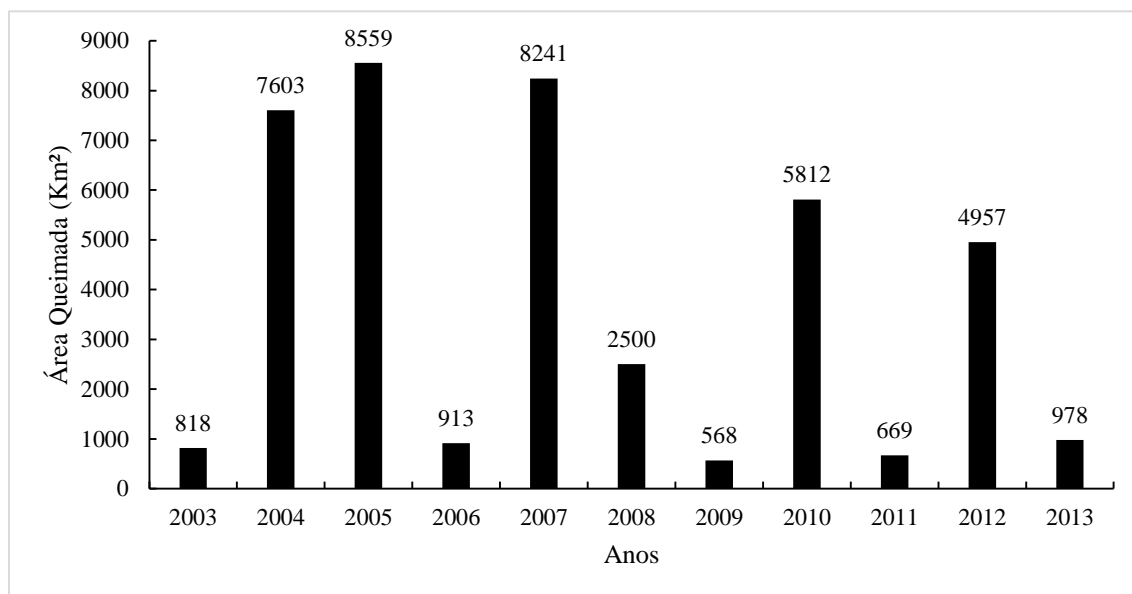


Figura 2.5 - Área total queimada no bioma Pantanal nos anos de 2003 a 2013.

As classes de cobertura e uso da terra mais atingidas por queimadas foram as áreas naturais de Savana (Cerrado e Estépica) e Formação pioneira. Na **Tabela 2.2** é possível observar a quantidade de área queimada em cada formação do bioma Pantanal, o total de área queimada no ano e a percentagem de área queimada em relação à área total do bioma.

Tabela 2.2 - Áreas queimadas por cobertura e uso da terra segundo dados do PROBIO.

Formação	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
	Áreas queimadas (Km²)										
Área antrópica (Agricultura e Pastagem)	55	136	228	30	365	63	8	299	47	47	28
Floresta Estacional Decidual	9	15	40	6	20	21	3	9	-	30	2
Floresta Estacional Semi-decidual	12	74	208	6	192	24	14	211	36	168	7
Formação pioneira	108	358	2008	31	1462	266	67	527	183	713	154
Refúgios Vegetacionais	-		9	-	18	3	-	3	-	6	0
Savana-Cerrado	506	5913	4392	570	4895	1770	45	4158	383	1872	377
Savana-Estépica	128	1100	1649	269	1289	351	430	604	21	2121	410
Vegetação secundária	-	6	25	-	0	2	0	2	0	-	-
TOTAL	818	7.603	8.559	913	8.241	2500	568	5.812	669	4.957	978
%	0,54	5,03	5,66	0,60	5,45	1,65	0,38	3,84	0,44	3,28	0,65

O regime de queima cria um verdadeiro mosaico na cobertura vegetal, resultando em áreas com diferentes densidades de biomassa e fases fenológicas. O mosaico da vegetação pode ser mapeado em relação ao número de anos sem queima. O mapeamento da recorrência de queimadas é muito importante para prever o risco de queimadas futuras, ou seja, é possível localizar as áreas que não foram atingidas por fogo há mais tempo e que, portanto, tornam-se mais suscetíveis ao fogo devido ao maior acúmulo de biomassa combustível (FRANÇA et al., 2007). A **Tabela 2.3** e a **Figura 2.6**, resultantes da sobreposição dos mapeamentos anuais, demonstram a recorrência mínima de queimadas que ocorreram no bioma Pantanal no período de 2003 a 2013.

Tabela 2.3 - Recorrência das queimadas no bioma Pantanal no período de 2003 a 2013.

Número de queimadas	Área (Km²)	% do Pantanal
Não queimou	131.298,0	79,9
Queimou no mínimo 1 vez	23.621,8	14,3
Queimou no mínimo 2 vezes	7.470,5	4,5
Queimou no mínimo 3 vezes	1.660,3	1,0
Queimou no mínimo 4 vezes	206,5	0,1
Queimou no mínimo 5 vezes	14,8	0,01
Queimou no mínimo 6 vezes	2,3	0,0014
Queimou no mínimo 7 vezes	0,3	0,0002

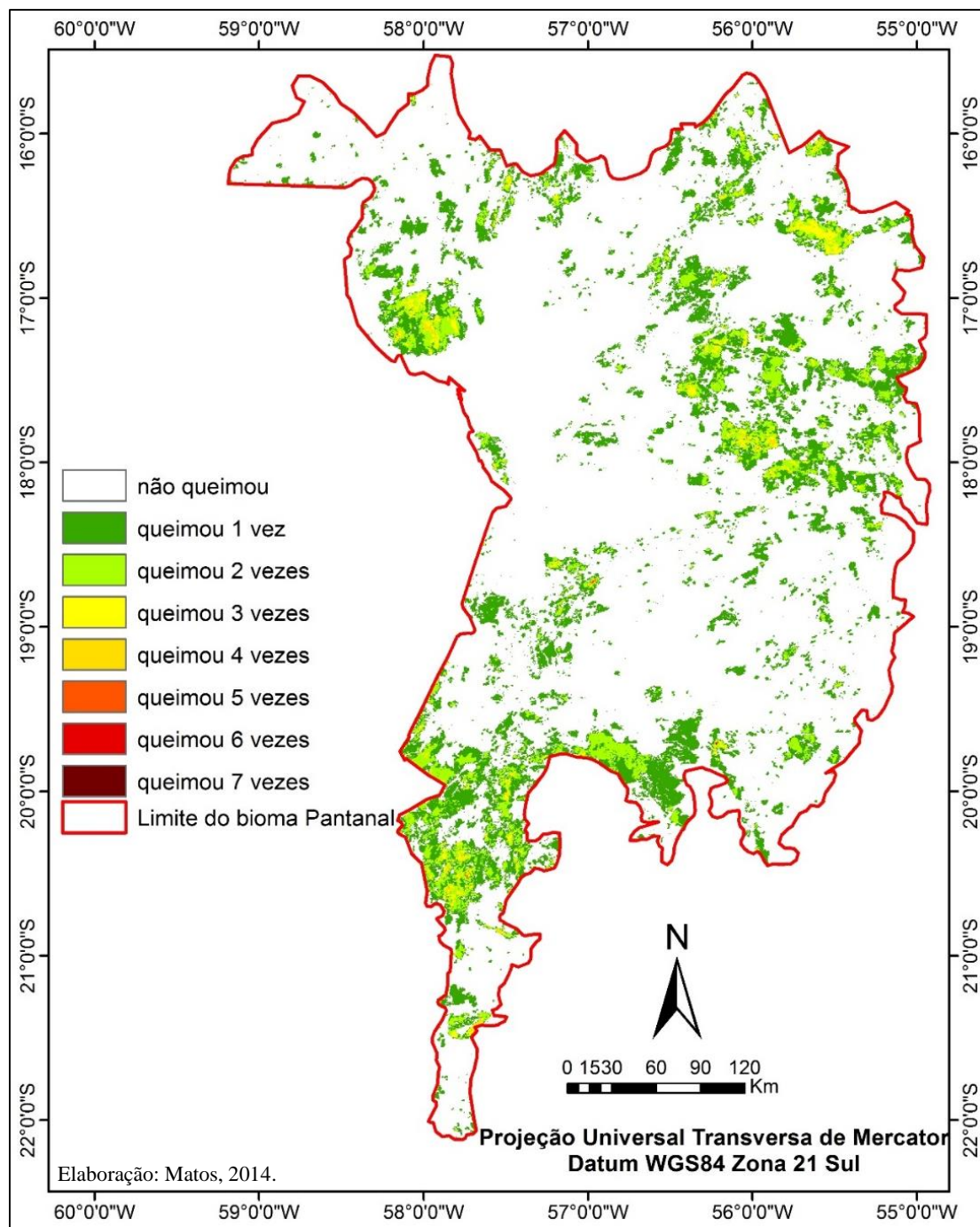


Figura 2.6 - Mapa de recorrência de queimadas no bioma Pantanal, no período de 2003 a 2013.

Aproximadamente 80% da área não queimou nenhuma vez no período mapeando; aproximadamente 14% da área queimou pelo menos uma (1) vez; aproximadamente 5% queimou pelo menos duas (2) vezes e 1% queimou pelo menos três (3) vezes no período analisado. Possivelmente, ocorreram outras queimadas nessas áreas em períodos distintos ou mesmo no período de análise, mas, devido às limitações de resolução espacial do sensor MODIS e o estudo se limitar unicamente ao mapeamento do mês de setembro, elas não puderam ser mapeadas.

As áreas em que a ocorrência das queimadas se repetiram no mínimo quatro (4) vezes se concentram principalmente na região sul, noroeste e nordeste do bioma. Essas áreas queimadas somam aproximadamente 206,5 Km² e os tipos de vegetação mais atingidas foram Savana-Cerrado e Savana-Estépica, com 110,2 e 71,4 Km², respectivamente. As áreas que queimaram no mínimo cinco (5) vezes encontram-se distribuídas por todo o bioma, somando ao todo 14,8 Km²; as vegetações mais atingidas foram a Savana-Cerrado e a Savana-Estépica, com 5,8 e 4,0 Km², respectivamente. Somente 2,3 Km² de área queimou pelo menos seis (6) vezes no período, onde as vegetações mais atingidas foram Savana-Cerrado e Vegetação pioneira, somando respectivamente 1,2 e 0,6 Km². Apenas 0,3 Km² no mínimo sete (7) vezes no período analisado, encontrando-se sobre Savana-Cerrado.

Segundo Schüle (1990), citado por Rivera-Lombardi (2003), a recorrência do fogo em uma região vai depender, sobretudo, da distribuição do material combustível, sua frequência de combustão e conteúdo de umidade. Por exemplo, áreas caracterizadas por precipitações sazonais, onde se verifica um acúmulo de biomassa durante o período úmido e predominância de estrato rasteiro, em um período seco longo a recorrência de queimadas tende a aumentar.

2.4. CONCLUSÕES

O produto MCD45A1 se mostrou eficiente no mapeamento temporal de áreas queimadas no bioma Pantanal, visto os resultados verificados no presente trabalho. Embora existam limitações em relação a resolução espacial do sensor, o que resulta em erros de exclusão, as principais vantagens do produto são:

- Discrimina corretamente as áreas queimadas;
- Apresenta resolução temporal mensal; e
- Possui cenas que cobrem grandes extensões de área (1.200 x 1.200 Km).

Desta forma, estudos e mapeamentos históricos de queimadas, por meio do produto MCD45A1, poderão ser realizados em outros períodos no Pantanal, bem como em outros biomas, de tal forma que possam contribuir para melhor entendimento dos regimes de queimadas, efeitos e manejo do fogo, desde que seja realizada a avaliação da acurácia de parte do mapeamento. Os resultados também poderão ser úteis na definição de estratégias para prevenção e combate aos incêndios florestais.

CAPÍTULO III: ANÁLISE DO PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS ÁREAS QUEIMADAS NO BIOMA PANTANAL

3.1. INTRODUÇÃO

Entre os vários problemas ambientais enfrentados pelo Brasil, as queimadas estão entre as principais, uma vez que as emissões dos gases resultantes da queima da biomassa colocam o país entre os principais responsáveis pelo lançamento de gases do efeito estufa no planeta. Além de contribuir com o aquecimento global e consequente mudanças climáticas, causam inúmeros prejuízos econômicos, sociais e ambientais, perda da biodiversidade, desertificação e desflorestamento (IBAMA, 2013).

Neste contexto, existe a necessidade de se avançar continuamente no controle às queimadas em ambientes naturais, o que motiva a produção de tecnologias que proporcionem o monitoramento da ocorrência das queimadas. Os sistemas de informações geográficas (SIG), com dados oriundos de sensoriamento remoto, podem proporcionar uma visão geral da distribuição temporal, espacial e identificar padrões dos incêndios florestais em diferentes escalas (PEREIRA et al., 2013).

De acordo com Fernandes et al. (2011), a grande maioria dos estudos conduzidos no Brasil atuam principalmente na detecção de queimadas e não na construção de cenários que possibilitem apontar áreas susceptíveis a ocorrência desse fenômeno. Assim, o uso de técnicas de análise espacial se mostra como importante ferramenta que possibilita a identificação de áreas suscetíveis à ocorrência de queimadas (PEREIRA et al., 2013).

O estudo da análise espacial proporciona percepção visual da distribuição do fenômeno analisado, além de mensurar propriedades e relacionamentos, permiti a tradução dos padrões existentes e contribui para a compreensão do fenômeno (DRUCK et al., 2004). Segundo Silva et al. (2013), a frequência, intensidade, proporção e o período de ocorrência, evidenciam as características históricas dos incêndios.

Neste sentido, é imprescindível estabelecer políticas de prevenção e combate aos incêndios florestais. Porém, para isso, é preciso conhecer o perfil das queimadas, isto é, saber onde ocorrem para definir as regiões de maior risco e estabelecer prioritariamente para essas regiões, programas mais intensivos de prevenção e combate (SOARES; BATISTA, 2007).

De acordo do Koutsias et al. (2014), o mapeamento das zonas de risco de incêndios ajuda a orientar *a priori* os gestores, de forma que atuem apropriadamente; além de ser uma vantagem operacional estratégica para auxiliar nas tomadas de decisão, pois tais ações podem ser aplicadas com prioridade, espacial e temporal, dentro de zonas de alto risco. Amatulli et al. (2007), afirmam que estas zonas de risco podem expressar a susceptibilidade de uma área à ocorrência de incêndios em termos de frequência.

Diversos trabalhos utilizaram análises estatísticas espaciais para determinar o padrão de distribuição de queimadas (DE LA RIVA et al., 2004; FUENTES-SANTOS et al., 2013; PEREIRA et al., 2013; AMATULLI et al., 2007; KUTER et al., 2011a; KUTER et al., 2011b; BALATSOS et al., 2007; YANG et al., 2006; PODUR et al., 2003; KOUTSIAS et al., 2014).

Desta forma, o objetivo do presente capítulo foi utilizar análises estatísticas não-paramétricas para descrever o padrão de distribuição espacial de incêndios florestais no bioma Pantanal de 2003 a 2013, apontando quais as regiões mais críticas em relação a ocorrência de queimadas e a localização das Unidades de Conservação.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1. Área de estudo

A área de estudo corresponde ao bioma Pantanal, que cobre aproximadamente 150.355 Km² e está localizado entre os paralelos 15° e 22° de latitude sul e entre os meridianos 55° e 59° de longitude oeste. Para maiores detalhes ver Referencial Teórico deste trabalho.

3.2.2. Base de dados

Neste capítulo foram utilizados os dados obtidos pelo mapeamento temporal das queimadas ocorridas no bioma Pantanal, por meio do produto MODIS MCD45A1, no mês de setembro de 2003 a 2013.

O evento considerado no estudo consistiu no centroide de cada polígono de áreas queimadas, mapeadas pelo produto, os quais foram gerados a partir da ferramenta *Feature to Point* disponível no software ArcGIS 10. O termo evento está associado a algum tipo de fenômeno localizável no espaço, dentro de uma escala de investigação e que possa ser

representado por pontos (PEREIRA et al., 2013), cuja localização foi gerada por mecanismos estocásticos (DRUCK et al., 2004).

3.2.3. Função K de Ripley

Primeiramente, foi utilizada a função K de Ripley para avaliar a distribuição espacial dos eventos em diferentes escalas simultaneamente, por meio do software CrimeStat 3.3. Foram realizadas 99 simulações para construir os intervalos de confiança (envelopes) com os resultados máximos e mínimos, através das simulações de Monte Carlo. O erro admitido foi dado por $(1/(m+1))$, onde “m” é o número de simulações, portanto, o nível de confiança utilizado foi de 1% de erro. Basicamente, a estimativa da função univariada K, possibilita testar a hipótese de Completa Aleatoriedade Espacial (CAE), assim, é possível investigar a possibilidade do padrão de distribuição espacial de um evento se comportar de forma agrupado, aleatória ou regular (PEREIRA et al., 2013).

Para analisar os dados, utilizou-se a função transformada $\hat{L}(h)$ que indica uma atração espacial, ou agrupamento, entre os eventos com valores positivos, ou seja, se todos os valores observados de $\hat{L}(h)$ estiverem acima do intervalo de confiança (envelopes) e forem positivos, o agrupamento está em toda a escala considerada no estudo. Os valores negativos indicam uma repulsão espacial (regularidade) entre os eventos na escala, assim, estimativas negativas que estiverem abaixo do intervalo de confiança inferior, apresentam regularidade em toda a escala. Valores dentro do intervalo de confiança são considerados aleatórios (PEREIRA et al., 2013).

3.2.4. Estimador de densidade Kernel

Posteriormente, por meio da ferramenta *Kernel Density* do software ArcGIS 10, foi gerado mapa de densidade de ocorrência de queimadas através do método estimador de densidade *Kernel*, o qual possibilita visualizar espacialmente o padrão de densidade dos eventos considerados no estudo, ou seja, converte os eventos pontuais em dados de superfície contínua.

É preciso definir a largura de banda (h), vizinhança do ponto a ser interpolado, o qual controla o grau de alisamento da superfície gerada. Entretanto, é muito difícil definir esse valor de forma subjetiva, o que pode gerar resultados ambíguos, pois esses valores dependem da escala adotada e das características específicas da área estudada (DE LA RIVA, et al., 2004; AMATULLI et al., 2007). De acordo com Liu et al. (2010), a função

K e o estimador de densidade kernel podem ser combinados perfeitamente para identificar o padrão de distribuição espacial de uma histórico de incêndios florestais. Desta forma, considerou-se como largura de banda (h) o valor da escala que representar o máximo padrão agregado dos eventos segundo a função K de Ripley.

Para melhor representação e análise dos resultados da interpolação, definiu-se cinco (5) classes de densidade: 1) muito baixa, 2) baixa, 3) média, 4) alta e 5) muito alta (SILVA et al., 2013).

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado gráfico da função K para o total de áreas queimadas no período analisado está apresentado na **Figura 3.1**.

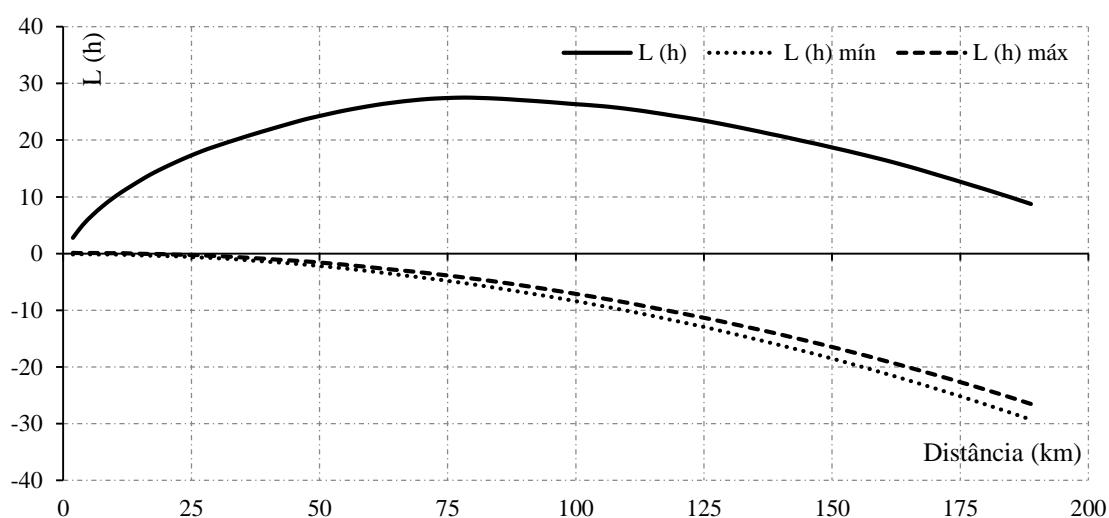


Figura 3.1 - Função K de Ripley para as queimadas no bioma Pantanal de 2003 a 2013.

Observa-se que o padrão de distribuição espacial dos incêndios variou em diferentes escalas. Os valores obtidos apontam para a rejeição da hipótese de Completa Aleatoriedade Espacial (CAE), pois os valores observados de \hat{L} permanecem fora do intervalo de confiança e estão acima do limite superior do intervalo, portanto, apresentam padrão agrupado de distribuição espacial.

Até aproximadamente 77 Km, o valor observado de \hat{L} é máximo, ou seja, os eventos estão mais fortemente agrupado. A partir de 77 Km até aproximadamente 188 Km, o padrão de distribuição apresenta menor grau de agrupamento, o qual decresce suavemente. Portanto, a escala que melhor define o padrão de agrupamento das queimadas ocorridas no Pantanal é de 77 Km.

De acordo com Pereira et al. (2013), o padrão de distribuição agrupado das queimadas pode estar relacionado ao emprego do fogo como prática de manejo e condições de uso do solo, as quais favorecem a ocorrência de forma agregada e em regiões específicas. Fuentes-Santos et al. (2013), apontam que a distribuição espacial de queimadas dificilmente será completamente aleatória, pois a ocorrência destas em áreas específicas dependem de uma série de fatores relacionados com o tipo de proteção, práticas de prevenção, características da região e gestão das florestas. Yang et al. (2006), ao utilizarem a função K , apontam que o padrão de agrupamento observado entre a ocorrência de queimadas, não necessariamente sugere que exista forte dependência espacial, mas pode ser explicado pelos fatores ambientais, como por exemplo a distribuição da vegetação.

A partir da melhor escala definida pela função K , foi gerado mapas de densidade da distribuição de queimadas, por meio do método *Kernel*, o qual demonstra onde a ocorrência de queimadas apresentou maior densidade “*hot bed*” ou menor densidade “*cold bed*”, indicando visualmente que as ocorrências das queimadas não apresentam padrão completamente aleatório no bioma Pantanal (**Figura 3.2**).

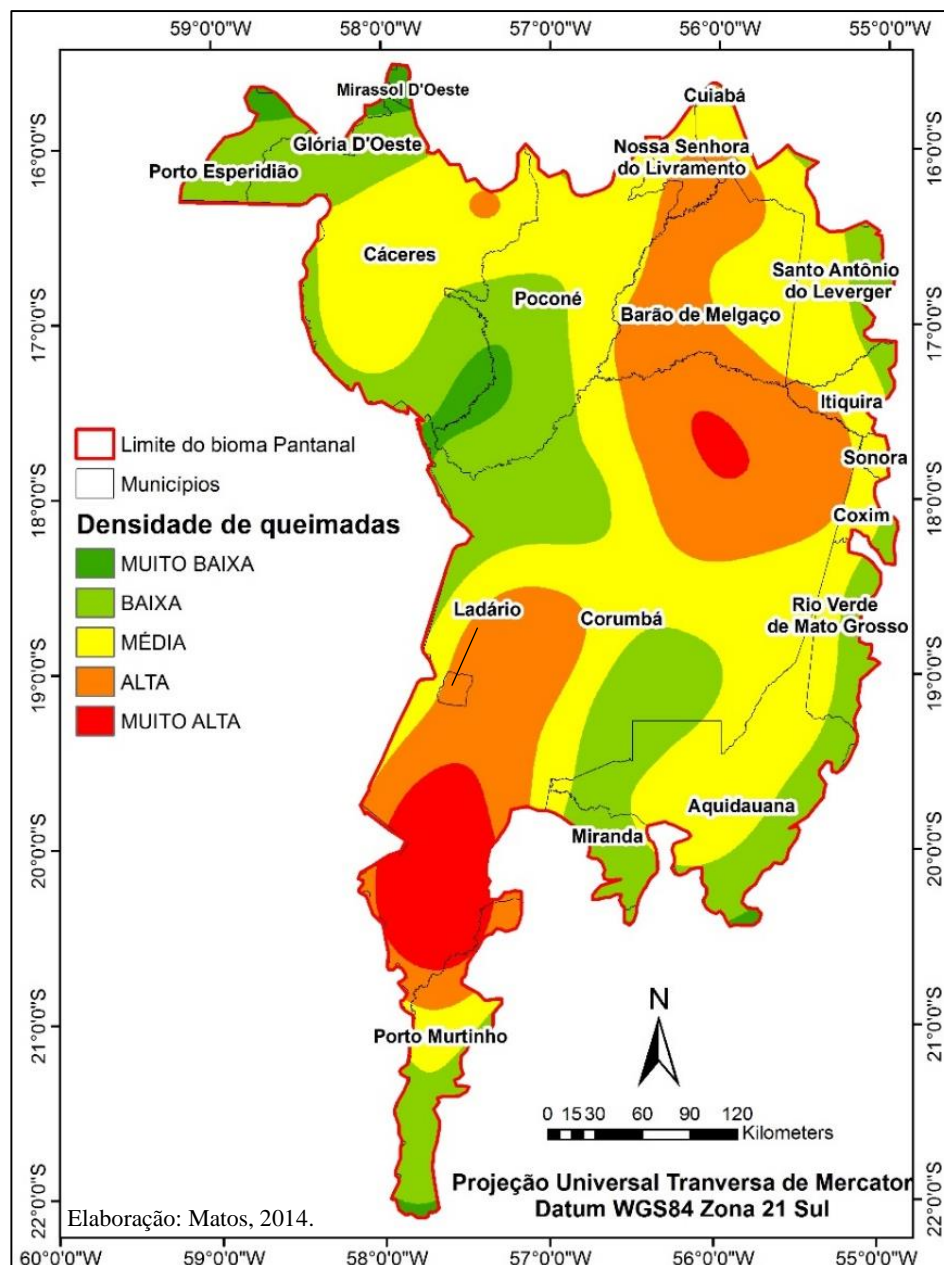


Figura 3.2 - Mapa de densidade de queimadas no bioma Pantanal.

O mapa de *Kernel* representa o resultado da interpolação dos eventos considerados na análise (áreas queimadas), onde se observa a intensidade pontual de ocorrência destes no bioma Pantanal. Manchas com densidade muito alta, em cor vermelha, foram estimadas na região sul e central do Bioma, majoritariamente no município de Corumbá/MS e pequena parte no município de Porto Murtinho/MS. A classe de densidade alta, representada pela cor laranja, ocorre em boa parte da região sul, nordeste e em pequena porção mais ao norte do bioma, grande parte nos municípios de Corumbá/MS, Barão de Melgaço/MT e Ladário/MS. As regiões de densidade média, baixa e muito baixa,

aparecem mais distribuídas ao longo de quase todo o bioma, concentrando-se em alguns locais.

Encontram-se inseridas no Pantanal 12 Unidades de Conservação (UC), nas categorias de Parque, Reserva Particular do Patrimônio Natural, Estação Ecológica e Monumento Natural (**Figura 3.3**).

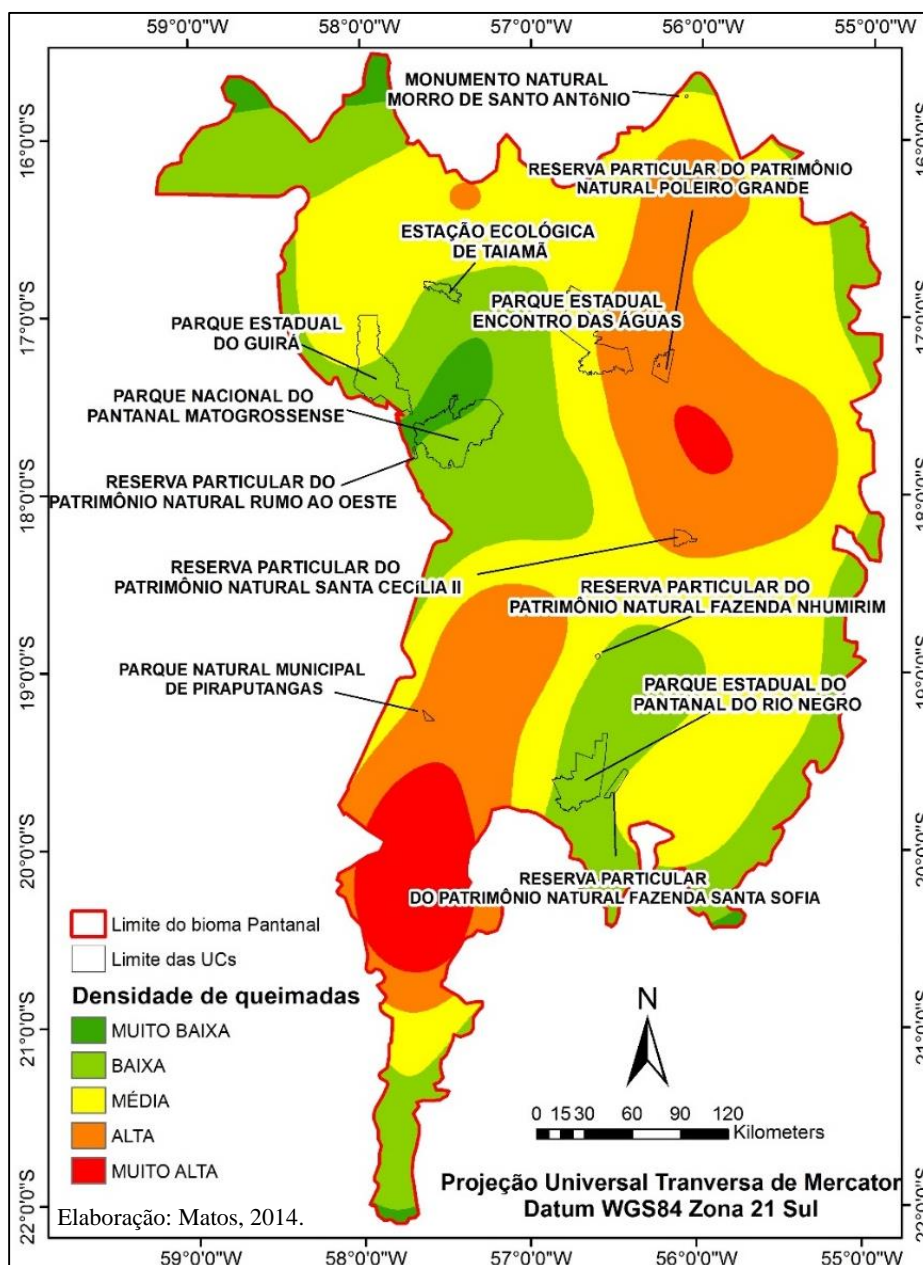


Figura 3.3 - Mapa de densidade das queimadas e as Unidades de Conservação presentes no Bioma Pantanal.

Ao se analisar a localização das UCs existentes no Bioma em relação as classes de densidade, percebe-se que nenhuma unidade encontra-se inserida em região com densidade muito alta de áreas queimadas. Nas áreas com alta densidade de queimadas

encontram-se quatro (4) UCs: Reserva Particular do Patrimônio Natural Poleiro Grande, parte do Parque Estadual Encontro das Águas, Reserva Particular do Patrimônio Natural Santa Cecília II e Parque Natural Municipal de Piraputangas. O Parque Estadual do Pantanal do Rio Negro, o Parque Nacional do Pantanal Matogrossense, Estação Ecológica de Taiaçu e grande parte do Parque Estadual do Guirá estão localizados nas regiões com densidade baixa e muito baixa de áreas queimadas.

3.4. CONCLUSÕES

A partir dos métodos utilizados neste trabalho, foi possível apontar as regiões mais críticas, isto é, com maior densidade de ocorrência de incêndios, além de identificar a escala de agrupamento destes eventos. Portanto, é possível direcionar as políticas de prevenção e combate aos incêndios florestais nestas áreas específicas, onde a escala de atuação mínima adotada poderá ser de aproximadamente 77 Km, com o objetivo de reduzir os custos e maximizar os benefícios e resultados.

No período analisado, a região sul e central do Bioma, especificamente o município de Corumbá/MS e pequena parte no município de Porto Murtinho/MS, apresentaram regiões com densidade muito alta de queimadas; nenhuma Unidade de Conservação encontrou-se inserida em áreas tidas com densidade muito alta de queimadas; apenas quatro unidades estão em regiões com densidade alta; e as outras unidades estão localizadas nas regiões com densidade baixa e muito baixa de áreas queimadas.

CAPÍTULO IV: MODELO PROBABILÍSTICO ESPACIAL DE ÁREAS QUEIMADAS NO BIOMA PANTANAL

4.1. INTRODUÇÃO

O fogo sempre foi bastante utilizado na agricultura para limpeza de áreas, remoção de espécies indesejadas e renovação de pastagens, o qual, quando não manejado de forma correta, pode gerar grandes incêndios fora de controle em vegetação natural. Desta forma, aliado ao padrão de ocupação territorial desordenado, na busca de novas fronteiras agrícolas, o uso indiscriminado do fogo têm contribuído para a ocorrência de grandes incêndios, provocando danos irreparáveis ao meio ambiente, à propriedade e à vida humana (NUNES, 2005), o que têm chamado muito atenção da comunidade internacional atualmente (ARIMA et al., 2007).

No Brasil, os incêndios florestais estão se tornando cada ano mais críticos, com o aumento da extensão da área queimada. Além do mais, a falta de programas institucionais consistentes é um dos problemas que contribuem para o agravamento deste cenário (NUNES, 2005).

De acordo com Batista (2000), no Brasil e no mundo, as estatísticas sobre ocorrência de incêndios florestais mostram que a grande maioria dos incêndios iniciam a partir de fontes decorrentes direta ou indiretamente das atividades antrópicas. Além do mais, é possível fazer um zoneamento indiretamente em função das fontes de fogo de origem antrópica, por meio de variáveis associadas com o nível de antropismo, como por exemplo, rede viária, demografia, etc.

As causas, ou fontes de ignição dos incêndios florestais são muito variáveis e podem ser divididas em dois grupos: naturais (incêndios gerados direta ou indiretamente por raios – única causa natural considerada) ou antrópicas (queimadas para limpeza de terreno, fumantes, incendiários, etc.). De acordo com Nunes (2005), o risco da ocorrência de incêndios está relacionado a agentes causadores, enquanto o perigo está relacionado as causas que aumentam ou diminuem a probabilidade de ocorrência. Segundo o autor, é importante explorar os fatores que determinam o risco e o perigo de incêndios florestais.

Além de se conhecer os riscos e perigos associados aos incêndios florestais, é importante conhecer a vulnerabilidade da região em função do histórico de incêndios, das

características socioeconômicas e dos principais fatores que possam gerar e afetar o comportamento do fogo (clima, condições do combustível, relevo, ignição, etc.).

Diversos trabalhos têm aplicado modelos estatísticos para simular e entender a influência de fatores ambientais e socioeconômicos na ocorrência de incêndios florestais (ARIMA et al., 2007; CHOMITZ; GRAY, 1996; MATRICARDI, 2013; MATRICARDI, 2007; TATAGIBA, 2010). Esses modelos também permitem realizar simulações espaciais para prever o potencial de impacto de mudanças de políticas públicas e uso da terra sobre a ocorrência de incêndios e desmatamento.

O objetivo deste capítulo foi verificar quais fatores exercem significativa influência na ocorrência das áreas queimadas no bioma Pantanal, por meio do *Probit*.

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1. Área de estudo

A área de estudo corresponde ao bioma Pantanal. É considerado a maior planície inundável do mundo e contém uma importante riqueza de diversidade biológica terrestre e aquática. Os ecossistemas que o bioma abriga são extremamente frágeis e estão sob a ameaça das novas tendências de desenvolvimento econômico e de construção de infraestrutura (SFB, 2014). Para mais detalhes consultar o Referencial Teórico deste manuscrito.

4.2.2. Modelo conceitual

Para a construção do modelo probabilístico *Probit*, assumiu-se que três principais fatores podem aumentar a probabilidade de ocorrência de incêndios florestais, a saber: condições ambientais (topográficas e climáticas), fontes de ignição e tipo de cobertura vegetal.

As variáveis quantitativas incluídas no modelo para representar as condições topográficas da área de estudo foram a declividade do terreno, a altitude e o azimute de orientação das encostas. Uma vez que, a topografia exerce grande influência sobre o clima, a vegetação e, conseqüentemente, sobre o material combustível. Assim, torna-se evidente a influência da topografia sobre a propagação do fogo, que podem ser mais bem definidos através da análise de cada um de seus três fatores básicos: altitude, orientação da encosta e declividade (SOARES; BATISTA, 2007).

Tendo em vista que no bioma Pantanal grande parte das queimadas ocorrem no período de seco do ano, para representar as condições climáticas no modelo, utilizou-se como variável quantitativa a precipitação média (mm) do período seco, isto é, de maio a setembro. Ao se avaliar os efeitos da precipitação, é importante considerar a distribuição estacional das chuvas, não apenas a quantidade de chuva que cai em um determinado local (BATISTA, 2000). Neste sentido, para representar a distribuição estacional da precipitação, foi aplicado um modelo geoestatístico de interpolação de dados espaciais para criar uma superfície interpolada. As superfícies contínuas foram obtidas a partir da ferramenta de interpolação geoestatística (Krigagem Ordinária), presente no ArcGIS 10. Em virtude de não haver um número razoável de estações climáticas espacialmente distribuídas no interior no Pantanal, optou-se por utilizar as estações presentes no interior e na circunvizinhança da região. Para isso, utilizou-se 11 estações climáticas, cujo os dados estão disponíveis na página do INMET (<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>).

Via de regra, os raios ocorrem no período de chuva e o presente trabalho analisa a ocorrência de incêndios durante a estiagem, neste sentido, assume-se que quaisquer incêndios florestais observados neste estudo foram iniciados por atividades antrópicas. Desta forma, foram incluídas no modelo as variáveis quantitativas: distância euclidiana de atividades agropecuárias (Km) e distância euclidiana de rodovias (Km).

Para averiguar se a ocorrência das áreas queimadas no Pantanal sofre alguma influência espacial em relação aos sentidos latitudes, longitudes e diagonal (latitude x longitude), foram criadas variáveis quantitativas referentes as coordenadas UTM em metros para.

Diversos aspectos relacionados ao comportamento do fogo variam em função do tipo de cobertura vegetal (BATISTA, 2000). Neste sentido, para representar os diferentes graus de vulnerabilidade da vegetação (ARIMA et al., 2007), incluiu-se no modelo as variáveis *dummy* correspondentes ao tipo de vegetação: (1) Cerrado, (2) Chaco, (3) Floresta, (4) Formação pioneira e (5) Área de tensão ecológica ou Contatos florísticos.

Foi criada uma variável *dummy* para representar a situação das unidades de conservação, pois espera-se que ocorram menos incêndios dentro de suas fronteiras territoriais (MATRICARDI, 2007).

Criou-se uma variável *dummy* para representar as possíveis variações das políticas de prevenção e combate aos incêndios a nível estadual. Segundo Arima et al. (2007), as diferenças nas políticas de Estados, destinadas a fiscalização ambiental, prevenção e combate ao fogo, podem afetar a probabilidade de ocorrência em uma dada região. Assim, considerou-se no modelo os estados de Mato Grosso do Sul e Mato Grosso, pois compõem o bioma Pantanal.

A seguir, estão listadas as variáveis independentes (x) utilizadas no modelo:

- Declividade do terreno (graus);
- Altitude (m);
- Azimute de orientação das encostas (graus);
- Precipitação média de maio a setembro (mm);
- Proximidade de rodovias (distância euclidiana em Km);
- Proximidade de atividade agropecuária (distância euclidiana em Km);
- Tipo de vegetação 1 (1 se Savana Cerrado, 0 caso contrário);
- Tipo de vegetação 2 (1 se Savana Estépica, 0 caso contrário);
- Tipo de vegetação 3 (1 se Floresta, 0 caso contrário);
- Tipo de vegetação 4 (1 se Formação pioneira, 0 caso contrário);
- Tipo de vegetação 5 (1 se Área de tensão ecológica ou Contatos florísticos, 0 caso contrário);
- Unidades de Conservação (1 se dentro de UC, 0 caso contrário);
- Estados (1 se dentro do Mato Grosso, 0 se dentro do Mato Grosso do Sul);
- Longitude (coordenadas UTM em m);
- Latitude (coordenadas UTM em m);
- Latitude x Longitude (representação diagonal em m);
- Ano da análise da ocorrência do fogo (1 se referente ao ano de interesse, 0 caso contrário). Essa variável se repetiu para cada ano da análise.

Para coletar os dados de cada ponto amostral, foi realizada uma amostragem sistemática-aleatória, a qual contribui para reduzir os efeitos da coincidência entre os padrões espaciais da paisagem e dos pontos amostrais (BURROUGH, 1998). O procedimento de sistematização foi utilizado para reduzir os efeitos de autocorrelação espacial na base de dados (ANSELIN, 2002; ARIMA et al., 2007). Primeiramente, criou-se uma grade regular de 5 x 5 Km sobre a área de estudo. Em seguida, foram gerados

pontos aleatórios dentro de cada grade ($n = 6.431$), porém, como a análise foi repetida também para cada ano, no total foram 70.752 pontos amostrais. Assim, o valor de cada pixel foi utilizado como unidade de observação e os valores da base de dados (variáveis independentes) foram coletados para cada ponto amostral alocado. Para variável dependente, que representa a ocorrência das áreas queimadas, considerou-se o valor um (1) caso o ponto amostral coincidia com área queimada e zero (0) caso contrário.

4.2.3. Base de dados

Os arquivos vetoriais e matriciais utilizados no presente trabalho encontram-se na **Tabela 4.1** a seguir:

Tabela 4.1 - Base de dados utilizados no presente trabalho.

Dados	Data	Escala	Fonte
Limite do bioma Pantanal	2004	5.000.000	IBGE
Limite do Estados brasileiros	2007		IBGE
Cobertura vegetal (PROBIO – Pantanal)	2002	250.000	MMA
Cobertura antrópica do Pantanal	2008	250.000	CSR-IBAMA/MMA
Unidades de Conservação			SISCOM – IBAMA
Modelo digital de elevação – SRTM	2004		LABGEO – UFRGS
Rodovias	2010		PNLT e DNIT

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das estatísticas dos fatores considerados na análise que afetam a ocorrência de incêndios florestais na área de estudo, estimados pelo modelo *Probit*, estão contidos na **Tabela 4.2**.

De acordo com o mapeamento das áreas queimadas, no período de 2003 a 2013, a probabilidade incondicional da ocorrência de áreas queimadas na área de estudo foi de 25,8%, para área total de 151.232 Km².

Os resultados do modelo ajustado, indicam que cerca 12,06% da variação da variável dependente podem ser atribuídas as variáveis explicativas. Todas as variáveis independentes em conjunto apresentaram impacto na ocorrência das áreas queimadas, já que a estatística da razão de verossimilhança é de 1901,52 e p-valor é menor que 0,05. De acordo com a tabela de classificação, o percentual de acertos do modelo foi de 97,65%.

Tabela 4.2 - Resultados da regressão *Probit*.

Variáveis	Coefficiente	Erro Padrão	z	P> z	Intervalo de Confiança [95%]	
Precipitação	-0,0077512	0,0015192	-5,1	0,000	-0,0107287	-0,0047736
Prox. rodovias (Km)	0,00000632	7,57E-07	8,35	0,000	0,00000483	0,0000078
Prox. atividade antrópica (Km)	-0,00000876	0,00000277	-3,16	0,002	-0,0000142	-3,23E-06
Declividade	-0,0005498	0,006773	-0,08	0,935	-0,0138245	0,012725
Orientação das encostas	-0,0002145	0,00014	-1,53	0,125	-0,0004889	0,0000599
Altitude	0,0015109	0,0002742	5,51	0,000	0,0009735	0,0020482
Unidade de Conservação	0,1985407	0,0684148	2,90	0,004	0,0644501	0,3326312
Latitude	-0,00000583	0,000000478	-12,2	0,000	-0,00000677	-0,00000490
Longitude	-0,0000811	0,00000742	-10,92	0,000	-0,0000956	-0,0000665
Lat x Long	1,01E-11	9,20E-13	10,97	0,000	8,29E-12	1,19E-11
Estados (omitido Mato Grosso do Sul):						
Mato Grosso	0,0057945	0,0424992	0,14	0,892	-0,0775024	0,0890913
Vegetação:						
Savana (Cerrado)	0,4435095	0,0448713	9,88	0,000	0,3555634	0,5314557
Savana (Estépica)	0,6693067	0,0575447	11,63	0,000	0,5565212	0,782092
Floresta	0,0745718	0,0709011	1,05	0,293	-0,0643918	0,2135355
Formação pioneira	-0,043374	0,0791522	-0,55	0,584	-0,1985095	0,1117614
Área de tensão ecológica	0,2011553	0,0519837	3,87	0,000	0,0992691	0,3030416
Ano (omitido 2013):						
2003	0,0301547	0,0873181	0,35	0,730	-0,1409856	0,2012951
2004	0,9446499	0,0702946	13,44	0,000	0,806875	1,082425
2005	0,9452041	0,0707335	13,36	0,000	0,8065691	1,08384
2006	0,0865497	0,0855148	1,01	0,311	-0,0810563	0,2541556
2007	0,9128038	0,0730859	12,49	0,000	0,7695581	1,05605
2008	0,4006711	0,0769062	5,21	0,000	0,2499377	0,5514046
2009	-0,0964258	0,1005632	-0,96	0,338	-0,2935261	0,1006745
2010	0,8196793	0,0710102	11,54	0,000	0,6805018	0,9588568
2011	-0,2205642	0,099311	-2,22	0,026	-0,4152103	-0,0259182
2012	0,8137297	0,0736516	11,05	0,000	0,6693752	0,9580842
Constante	43,81814	3,852683	11,37	0,000	36,26702	51,369260
n = 70.752; Pseudo R ² = 0,1206; Log likelihood = -6.933,4454						

A partir dos resultados obtidos, o efeito da precipitação na ocorrência do fogo apresentou significância estatística, já que o p-valor de 0,000 é menor que o nível de significância 0,05, ou seja, neste caso rejeita-se a hipótese nula e conclui-se que o

coeficiente da regressão para a variável foi estatisticamente diferente de zero. A variável está negativamente relacionada, isto é, quanto menor os valores da precipitação maior será a probabilidade da ocorrência do fogo. Por exemplo, a probabilidade de ocorrência aumenta em 2,1% quando se diminui a precipitação em 100 mm (**Figura 4.1**).

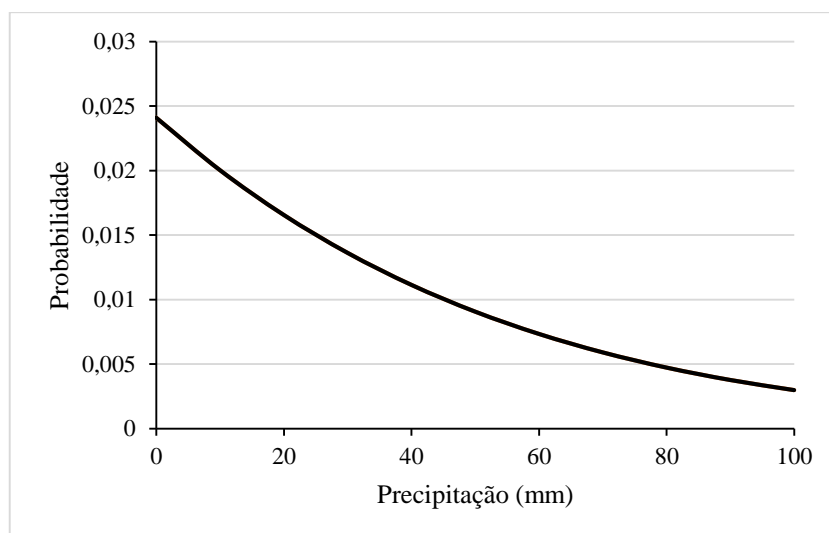


Figura 4.1 - Probabilidade da ocorrência de incêndios em relação a variação da precipitação (mm).

As condições climáticas do local influenciam a propagação do fogo, uma vez que existe uma forte correlação entre ocorrência de grandes incêndios e prolongados períodos de seca, pois longos períodos de estiagem afetam o potencial de propagação dos incêndios, principalmente pela secagem progressiva do material combustível morto, podendo afetar também o teor de umidade da vegetação viva, consequentemente, aumentando a probabilidade de ignição e a facilidade de propagação dos incêndios (SOARES; BATISTA, 2007). A precipitação influencia a umidade e a quantidade do material combustível em uma área (CHENEY; SULLIVAN, 2008), desta forma, a precipitação é importante porque dificulta ou mesmo tornando impossível o início e a propagação do fogo (BATISTA, 2000). Por exemplo, se a distribuição das chuvas é uniforme durante todo o ano em um determinado local, o potencial de ocorrência e propagação dos incêndios é menor em relação a um local onde a estação chuvosa ocorre concentrada em alguns meses (BATISTA, 2000). Matricardi (2007), ao analisar o efeito do déficit hídrico sobre a probabilidade de ocorrência de incêndios na região Amazônica, observou que a variável contribuiu significativamente no aumento da probabilidade de incêndios florestais, onde um incremento do déficit hídrico de 0 a 200 mm durante o período seco do ano aumentara a probabilidade de ocorrência de incêndios em 2,5%.

A distância de rodovias, considerado como um importante fator de origem de incêndios, apresentou significância estatística a 95% de probabilidade, porém positivamente relacionada, indicando que a probabilidade eventualmente aumenta com o incremento da distância das rodovias, ou seja, quanto mais próximo das rodovias menor será a probabilidade da ocorrência de áreas queimadas (**Figura 4.2**).

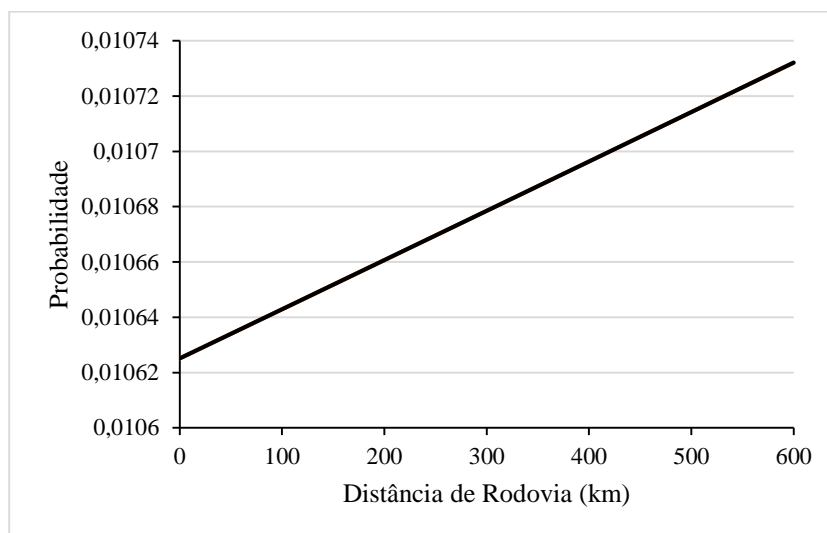


Figura 4.2 - Probabilidade da ocorrência de incêndio florestal com a variação da distância de rodovias.

O fato da probabilidade de ocorrência de áreas queimadas aumentar com o incremento da distância das estradas não era esperado, pois, as estradas permitem o acesso de pessoas e veículos, causando maiores riscos de incêndios por vários fatores: incêndios criminosos, cultos religiosos, incêndios iniciados por cigarros, pequenas fogueiras, entre outros (FERRAZ; VETTORAZZI, 1998). Entretanto, não é possível afirmar que as estradas não sejam prováveis fontes de ignição de incêndios na área de estudo, talvez o fogo inicia próximo às estradas, mas, devido as características de propagação do fogo em vegetação contínua, este acaba se distanciando das estradas. Ressalta-se que, para melhorar a compreensão da influência das estradas na probabilidade de ocorrência das queimadas, recomenda-se a utilização de todos os tipos de estradas (pavimentadas e não-pavimentadas) no modelo e, de acordo com Tatagiba (2010), a separação das estradas por intensidade de tráfego poderia ser mais significativa, ao invés de considerá-las juntas.

No Pantanal o fogo é bastante utilizado como elemento de produção e manejo das pastagens para limpeza e remoção de espécies indesejadas. Este tipo de prática, quando não bem manejada, pode gerar ocorrência de incêndios fora de controle em vegetação natural. Os resultados estimados pelo modelo *Probit*, indicam que houve significância

estatística, positivamente relacionada, entre a distância de atividades agropecuárias e ocorrência do fogo, já que o p-valor é menor que o nível de significância de 0,05, ou seja, áreas mais próximas das atividades antrópicas têm maior probabilidade de ocorrência (**Figura 4.3**).

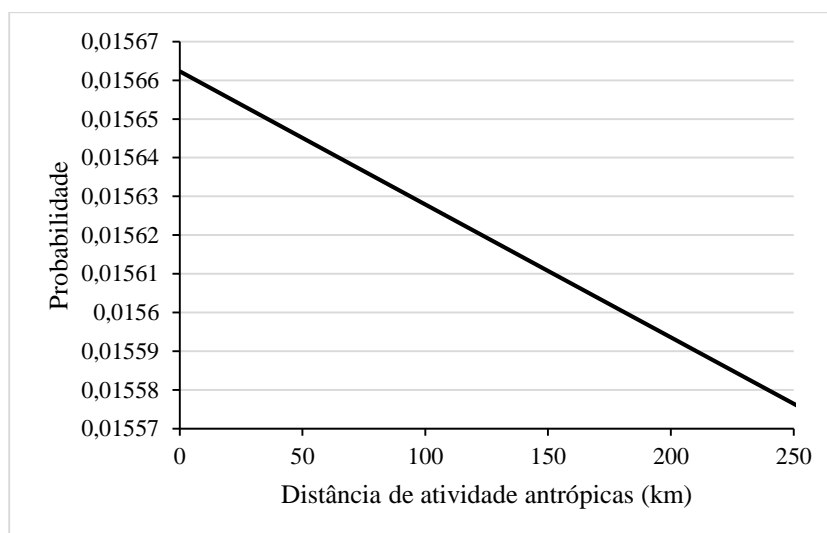


Figura 4.3 - Probabilidade da ocorrência de incêndios com a variação da distância de áreas antrópicas.

De acordo com o modelo, os efeitos da declividade do terreno e da orientação das encostas não foram estatisticamente significantes na ocorrência do fogo, a 95% de probabilidade. Entretanto, estes resultados não indicam que esses fatores não influenciem no comportamento do fogo, apenas não exerceram grandes efeitos na ocorrência das áreas queimadas na região de estudo, possivelmente porque a região Pantaneira apresenta relevo bastante plano.

A variável altitude apresentou relação significativa na ocorrência do fogo, porém, positivamente relacionada, isto é, áreas mais altas têm maior probabilidade de ocorrência das queimadas (**Figura 4.4**). A probabilidade de incêndios no ponto médio de altitude (128 m) é de 1,35%. Tatagiba (2010), ao avaliar o efeito da altitude na probabilidade de ocorrência de incêndios florestais no Parque Nacional da Chapa dos Veadeiros – GO, também observou relação inversamente proporcional à esperada. Entretanto, de acordo com a literatura esperava-se relação contrária. Segundo Ribeiro et al. (2008), a variação da altitude influencia o risco de incêndio devido à relação com a umidade do ar, ou seja, a altitude representa indiretamente a umidade do material combustível e a consequente redução do risco a ocorrência de fogo. Possivelmente, a baixa variação de altitude no Pantanal, média de 128 metros e relevo bastante plano, não produza os efeitos esperados.

Além do mais, a velocidade do vento é maior nas áreas mais altas de um morro (CHENEY; SULLIVAN, 2008), conseqüentemente, o material combustível nestas áreas tende a ter menor teor de umidade, favorecendo a propagação e ignição do fogo. De acordo com Allem e Valls (1987), as áreas afetadas por queimadas encontram-se em zonas mais altas e secas, uma vez que as áreas mais baixas da região tendem a ser alagadas, confirmado este fato.

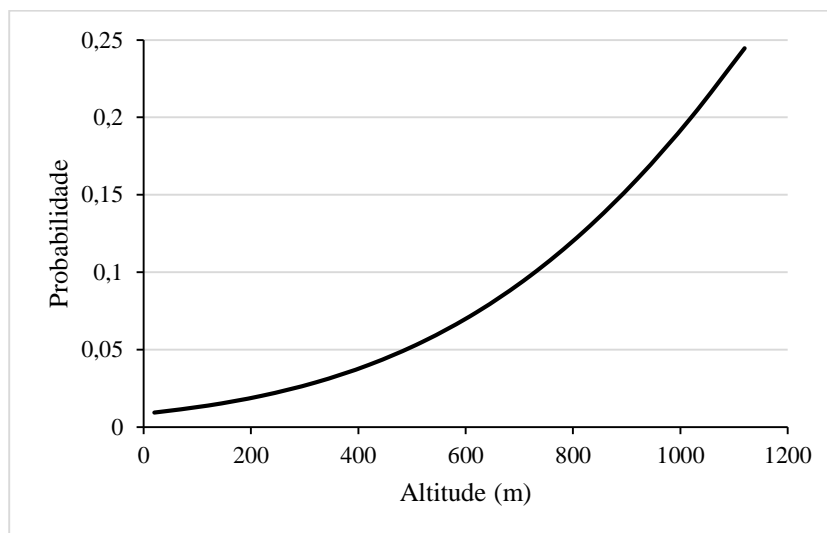


Figura 4.4 - Probabilidade da ocorrência de incêndios em relação a variação de altitude.

O estado de Mato Grosso não apresentou influência estatisticamente significativa na probabilidade de ocorrência das queimadas, em relação ao estado omitido, Mato Grosso do Sul. Os resultados do modelo indicam que os incêndios ocorrem em qualquer estado de forma semelhante, mesmo que apenas 35% do estado de Mato Grosso componha o bioma Pantanal.

De acordo com o modelo, as variações espaciais em longitude, latitude e diagonal (lat x long) apresentaram significância estatística a 95% de probabilidade. A probabilidade de incêndios aumenta no sentido leste a oeste, de norte a sul e de noroeste a sudeste na área de estudo (**Figura 4.5, Figura 4.6 e Figura 4.7**). Este fato demonstra que existe tendência de agrupamento de áreas queimadas em regiões específicas do Bioma.

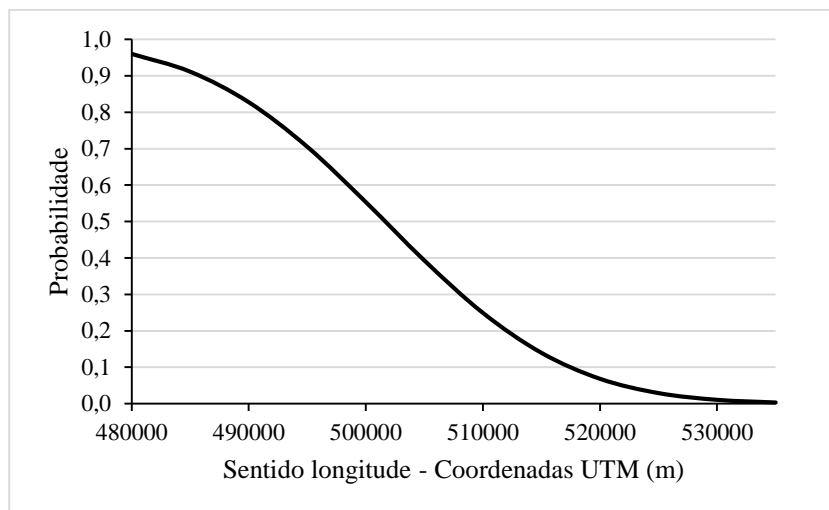


Figura 4.5 - Probabilidade da ocorrência de incêndios em relação a variação no sentido longitude.

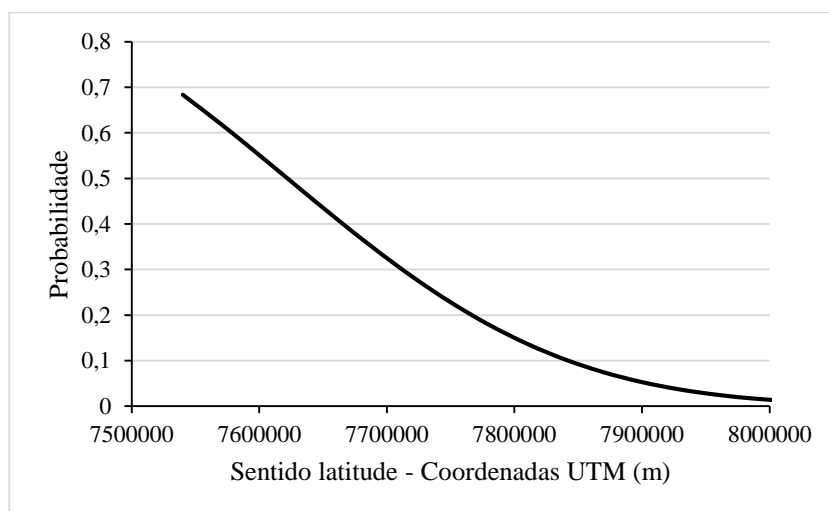


Figura 4.6 - Probabilidade da ocorrência de incêndios em relação a variação no sentido latitude.

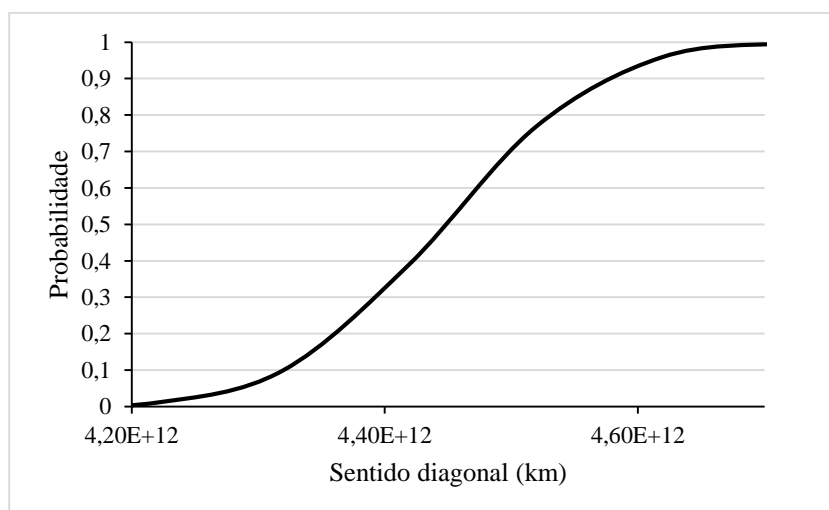


Figura 4.7 - Probabilidade da ocorrência de incêndios em relação a variação no sentido diagonal (lat x long).

A **Figura 4.8** mostra os anos que apresentaram influência significativa na ocorrência de áreas queimadas no bioma Pantanal, a 95% de probabilidade. O ano de 2005, 2007 e 2004 foram os anos mais atingidos por áreas queimadas, na ordem de 8.559 Km², 8.241 Km² e 7.603 Km², respectivamente. Entretanto, 2004 e 2005 apresentaram maior probabilidade de ocorrência, possivelmente, devido à distribuição espacial mais homogênea dos incêndios, se comparado com 2007. Os demais anos, 2003, 2006 e 2009, não foram estatisticamente significativos na probabilidade de ocorrência do fogo, sobretudo, porque nestes anos registrou-se menores quantidades de áreas queimadas, em relação aos demais anos.

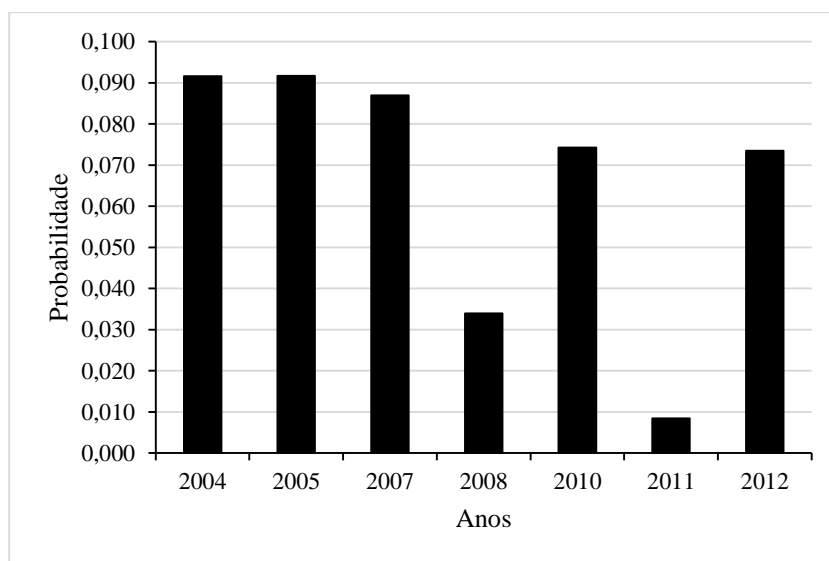


Figura 4.8 - Probabilidade da ocorrência dos incêndios florestais.

Com base no modelo, foi observado que há probabilidade ligeiramente maior de ocorrência de incêndios dentro das Unidades de Conservação localizados no Pantanal (**Figura 4.9**). Apesar da pequena diferença, os resultados mostram que as unidades não têm sido razoavelmente eficazes em impedir ou mesmo diminuir a ocorrência de incêndios dentro de seus limites, devido a uma série de fatores. Provavelmente, os incêndios que ocorrem no interior das unidades, iniciam fora destas. Entretanto, este fato precisa ser investigado com mais detalhes em estudos futuros, incluindo na análise a distância euclidiana das áreas protegidas.

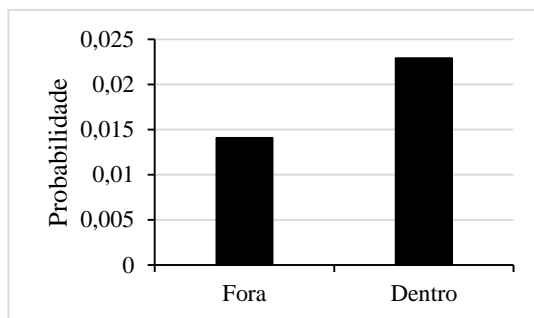


Figura 4.9 - Probabilidade de ocorrência de incêndios dentro e fora das Unidades de Conservação localizadas no Pantanal.

A **Figura 4.7** a seguir apresenta as probabilidades de ocorrência de áreas queimadas para cada tipo de vegetação.

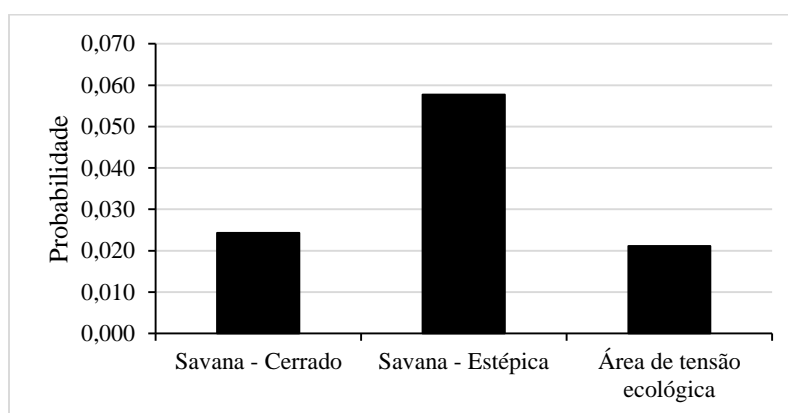


Figura 4.10 - Probabilidade de ocorrência de incêndios florestais em diferentes tipos de vegetação.

Os tipos de vegetação que apresentaram significância estatística, a probabilidade de 95%, foram as mais atingidas por áreas queimadas, de acordo com o mapeamento de 2003 a 2013. Por exemplo, em 2007 aproximadamente 60% e 15% dos incêndios ocorreram em Savana-Cerrado e Savana-Estépica, respetivamente. Em 2005, cerca de 51% e 20% dos incêndios também ocorreram em Savana-Cerrado e Savana-Estépica, respetivamente.

As probabilidades observadas para Savana-Estépica (5,7%) e Savana-Cerrado (2,4%), estão relacionadas, sobretudo, as características do material combustível da vegetação, favoráveis a ocorrência e propagação do fogo. Tais características variam em função do tipo de vegetação, que por sua vez controlam o comportamento do fogo. Por exemplo, a quantidade do material combustível varia em função do tipo, idade e espaçamento da vegetação (NUNES, 2005), bem como do tempo sem queima (MIRANDA et al., 2010). Os efeitos e o comportamento do fogo em queimadas dependem do combustível, de sua composição e dinâmica (MIRANDA et al., 2010). De

acordo com Miranda et al. (2010), em fisionomias campestres, entre 50% e 80% do total de combustível fino (principal componente consumido durante uma queima) do estrato rasteiro é representado pelas graminóides. Desta forma, as vegetações mais abertas apresentam maior potencial de propagação do fogo, se comparado com vegetação mais densas e fechadas, sobretudo devido as características do material combustível, quantidade e microclima favorável (SOARES; BATISTA, 2007). As Savana-Estépica ocupa área menor que a Savana-Cerrado, porém, a probabilidade de incêndios é maior na primeira vegetação. Salienta-se que, além das características da vegetação, outros fatores podem estar influenciando este fato, tais como: proximidade de áreas agrícolas, proximidade de estradas, altitude, etc. Além do mais, a Savana-Estépica é uma tipologia vegetal campestre, geralmente, com estrato lenhoso decidual e espinhoso (IBGE, 2012), o que favorece a propagação do fogo. Para ser conclusivo, outras análises mais específicas deveriam ser realizadas. Área de tensão ecológica também foi estatisticamente significativa para esta análise, onde a probabilidade de ocorrência de incêndios florestais é de 2,1%. Provavelmente, pelo fato desta formação ser a segunda maior cobertura vegetal do Pantanal, sendo constituída principalmente por savana.

Nem todas as variáveis abordadas no modelo probabilístico apresentaram significância estatística na ocorrência de áreas queimadas, a 95% de probabilidade. Este fato não quer dizer que estas variáveis não influenciem na ocorrência e não mereçam atenção, apenas não tiveram grande peso segundo o modelo utilizado. Provavelmente devido: as características topográficas da área, pois o relevo da região pantaneira é bastante plano; as características da vegetação; a aleatoriedade por trás do fenômeno; do número de amostras utilizadas no modelo; ou mesmo da qualidade dos *inputs* utilizados no presente estudo, que podem limitar este tipo de análise.

4.4. CONCLUSÕES

Os fatores que apresentaram influência significativa sobre a probabilidade de ocorrência de incêndios foram: precipitação, proximidade de áreas antrópicas, proximidade de rodovias, altitude, latitude, longitude e lat x long. Em relação as variáveis locais, nem todas apresentaram significância estatística, apenas: Unidade de Conservação, Savana-Cerrado, Savana-Estépica e Áreas de transição. As variáveis temporais que apresentaram probabilidade de ocorrência foram: 2004, 2005, 2007, 2008, 2010, 2011 e 2012.

CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Tendo em vista os inúmeros problemas ambientais e socioeconômicos gerados pelo excesso de áreas queimadas, quantificar, estudar sua dinâmica temporal e espacial, seu regime de queima, quais áreas são mais suscetíveis, além de conhecer os principais fatores responsáveis pela ignição e propagação dos mesmos, é de extrema importância como base para definições e implementações de políticas de combate e prevenção, de tal forma que reduzam os custos associados, tornando-as mais eficazes.

Neste sentido, o produto MCD45A1, apesar das limitações técnicas em relação a resolução espacial de 500 m, se mostrou como ferramenta útil e de fácil operação na discriminação de áreas queimadas, possibilitando o monitoramento mensal em grandes extensões (1.200 x 1.200 Km). Na utilização do produto em outras regiões, recomenda-se, sempre que possível, a validação de parte do mesmo por meio de dados de melhor resolução espacial, pois as características espectrais e as interferências atmosféricas intrínsecas da região podem diminuir a exatidão dos resultados, invalidando-os.

As estatísticas espaciais não-paramétricas se mostraram de extrema importância na caracterização do padrão de distribuição do fenômeno em questão. Estudos que consideram séries históricas de áreas queimadas mais extensas podem complementar a análise, aumentando a precisão dos resultados. Além do mais, os resultados também podem expressar a susceptibilidade de uma área à ocorrência de incêndios em termos de frequência, corroborando para a políticas de prevenção e combate. A partir dos resultados alcançados, verifica-se que a metodologia pode desempenhar um importante papel no mapeamento de áreas susceptíveis aos incêndios florestais com base em dados espectrais, no caso deste estudo o produto MODIS MCD45A1. Entretanto, ressalta-se que outras fontes de dados também podem ser utilizadas.

Em relação ao modelo probabilístico *Probit*, recomenda-se, para melhorar a análise em estudos futuros, a adoção de variáveis econômicas, como por exemplo, preço das principais *commodities* agrícolas produzidas na região estudada, bem como bases cartográficas mais completas e atuais. A combinação de variáveis ambientais e econômicas podem produzir resultados mais reais, que evidenciam a relação entre desenvolvimento econômico e preservação ambiental (ARIMA et al., 2007). Além do mais, vale ressaltar que, o fato de uma variável apresentar baixa probabilidade ou não ser estatisticamente significativa, não significa que ela não merece atenção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADÂMOLI, J. O Pantanal e suas relações fitogeográficas com os cerrados: discussão sobre o conceito “Complexo do Pantanal”. In: CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, 32., 1981, Teresina. **Anais...** Teresina: Sociedade Botânica do Brasil. p.109-119. 1982.

ADÂMOLI, J. Vegetação do Pantanal. In: Allem, A.C.; Valls, J.F.M. **Recursos forrageiros nativos do Pantanal Mato-Grossense**. Brasília: EMBRAPA-CENARGEN, 1987. 339 p.

ALLEM, A. C.; VALLS, J. F. M. **Recursos forrageiros nativos do Pantanal Mato-Grossense**. Brasília: EMBRAPA-CENARGEN, 1987. 339 p.

AMATULLI, G.; PERÉZ-CABELLO, F.; DE LA RIVA, J. Mapping lightning/human-caused wildfires occurrence under ignition point location uncertainty. **Ecological Modelling**, vol. 200, p. 321-333, 2007.

ANDERSEN, M. Spatial analysis of two-species interactions. **Oecologia**, Berlin, Springer-Verlag, v. 91, p. 134-140. 1992.

ANDERSON, L. O. Classificação e monitoramento da cobertura vegetal do estado de Mato Grosso utilizando dados multitemporais do sensor MODIS. **Dissertação de Mestrado**. São José do Campos: INPE, 247 p. 2004.

ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E.; DEFRIES, R. S.; MORTON, D. Assessment of deforestation in near real time over the Brazilian amazon using multitemporal fraction images derived from terra MODIS. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 2, n. 3, 2005.

ANDERSON, L. O.; ARAGÃO, L. E. O. C.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y. E. Detecção de cicatrizes de áreas queimadas baseada no modelo linear de mistura espectral e imagens índice de vegetação utilizando dados multitemporais do sensor MODIS/TERRA no estado do Mato Grosso, Amazônia brasileira. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 4, p. 445-456, 2005.

ANDRAE, M. Biomass burning: its history, use and distribution and its impact on environmental quality and global climate. In: LEVINE, J. S. (ed.). **Global biomass burning: atmospheric, climatic and biospheric implications**. Cambridge: MIT, p. 3-21. 1991.

ANSELIN, L. Under the hood: Issues in the specification and interpretation of spatial regression models. **Agricultural Economics**, v. 27, n. 3, p. 247-267. 2002.

ARAÚJO, F. M. DE.; JÚNIOR, L. G. F. Validação do produto MODIS MCD45A1 área queimada utilizando imagens LANDSAT TM para o bioma Cerrado. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos campos: INPE, 2011. p. 6410-6417. Disponível na biblioteca digital URLib: < <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p1569.pdf> >. Acesso em: 14 ago. 2014.

ARIMA, E.; SIMMONS, C.; WALKER, R.; COCHRANE, M. Fire in the Brazilian Amazon: A spatially explicit model for policy impact analysis. **Journal of Regional Science**. v. 47, n. 3, p. 541- 567. 2007.

BALATSOS, P.; KALABOKIDIS, K.; KOUTSIAS, N. Fire risk zoning at national level in Greece: Methodological approach and outcome. **4th International Wildland Fire Conference**, Seville, Spain, 10p. 2007.

BAPTISTA, G. M. M. Processamento de dados hiperespectrais. In: MENESSES, P. R.; ALMEIDA, T. de (Orgs.). **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. 1 ed. Brasília: UnB/CNPq, v.1, 2012.

BATISTA, A. C. Mapas de risco: uma alternativa para o planejamento de controle de incêndios florestais. **Floresta** **30** (1/2): 45- 54. 2000.

BOND, W. J.; KEELEY, J. E. Fire as a global “herbivore”: the ecology and evolution of flammable ecosystems. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 20, p. 387-394. 2005.

BOSCHETTI, L.; ROY, D. P.; JUSTICE, C. O.; GIGLIO, L. Global assessment of the temporal reporting accuracy and precision of the MODIS burned area product. **Int. J. of Wildland Fire**, v. 19, p. 705-709, 2010.

BOSCHETTI, L.; ROY, D.; HOFFMANN, A. A; HUMBER, M. **MODIS Collection 5.1 Burned Area Product - MCD45**. User’s Guide. Version 3.0.1. 2013.

BOWMAN, D. M.; BALCH, J. K.; ARTAXO, P.; BOND, W. J.; CARLSON, J. M.; COCHRANE, M. A.; D'ANTONIO, C. M.; DEFRIES, R. S.; DOYLE, J. C.; HARRISON, S. P.; JOHNSTON, F. H.; KEELEY, J. E.; KRAWCHUK, M. A.; KULL, C. A.; MARSTON, J. B.; MORITZ, M. A.; PRENTICE, I. C.; ROOS, C. I.; SCOTT, A. C.; SWETNAM, T. W.; VAN DER WERF, G. R.; PYNE, S. J. Fire in the Earth system. **Science**, v. 324, p. 481-484. 2009.

BRAUMANN, R.; CARNEIRO, F. G. **Os agentes econômicos em processo de integração regional – Inferências para avaliar os efeitos da ALCA**. Universidade de Brasília. Brasília, DF. 33p. 2002.

BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems**. Oxford, Oxford University Press. 1998.

CARDOZO, F. S.; LIMA, A.; PEREIRA, G.; SILVA, F. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; TAKEDA, M. M. G.; MORAES, E. C. Avaliação das imagens do produto MCD45A1 do sensor MODIS para a identificação de áreas queimadas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos campos: INPE, 2011. p. 7942-7949. Disponível na biblioteca digital URLib: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0646.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2014.

CARDOZO, E. L.; CRISPIM, S. M. A. **Queimada controlada no Pantanal**. Artigo de Divulgação na Mídia, Embrapa Pantanal, Corumbá-MS, n. 1, p.1-2. ago. 2000.

CHENEY, N. P.; SULLIVAN, A. **Grassfires: fuel, weather and fire behaviour**. CSIRO Publishing, Melbourne, Victoria. 2ª ed. 2008. 161 p.

CHOMITZ, K. GRAY, D. Roads, land use, and deforestation: a spatial model applied to Belize. **The World Bank Economic Review**, v. 10, n.3, p. 487- 512. 1996.

COUTINHO, L. M. As queimadas e seu papel ecológico. **BRASIL FLORESTAL**, v. 10, n. 44, p. 7-23. 1980.

COUTINHO, L. M. O conceito de bioma. **Acta bot. bras.**, v. 20, n. 1, p. 13-23, 2006.

DE LA RIVA, J., PÉREZ-CABELLO, F., LANA-RENAULT, N., KOUTSIAS, N. Mapping forest fire occurrence at a regional scale. **Remote Sensing of Environment**, v. 92, p. 363–369, 2004.

DIXON, P. M. Ripley's K function. **Encyclopedia of Environmetrics**. vol. 1, n. 3, p. 1796-1803. 2002.

DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 209 p. 2004.

EITEN, G. Brazilian savanas. In: HUNTLEY, B. J; WALKER, B. H. (eds). **Ecology of tropical savannas**. Berlin, Springer-Verlag, p. 25-47. 1982.

ENGESAT. Disponível em:

<<http://www.engesat.com.br/?system=news&action=read&id=528>> Acesso em: 01 de outubro de 2013.

FARIA, R. R.; BRAGA, R. T.; MIOTO, C. L.; PARANHOS FILHO, A. C.; SOUZA, F. L.; BINI, L. M. Correspondências entre classificação fisiográficas e padrões espaciais de assembleias de aves e mamíferos no Pantanal Brasileiro. **Ecología Austral**, v. 23, p. 8-17, 2013.

FERNANDES, M. C.; COURA, P. H. F.; SOUSA, G. M.; AVELAR, A. S. Avaliação geoecológica de susceptibilidade à ocorrência de incêndios no estado do Rio de Janeiro, Brasil. **Floram - Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 3, p. 299-309. 2011.

FERRAZ, S. F. B.; VETTORAZZI, C. A. Mapeamento de risco de incêndios florestais por meio de sistema de informações geográficas (SIG). IPEF–ESALQ. Universidade de São Paulo. **Scientia Forestalis**, n. 53, p. 39- 48. 1998.

FIGUEIREDO, G. C.; VIEIRA, C. A. O. Estudo do comportamento dos índices de Exatidão Global, Kappa e Tau, comumente usados para avaliar a classificação de imagens do sensoriamento remoto. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos campos: INPE, 2007. p. 5755-5762. Disponível na biblioteca digital URLib: < <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.13.17.35/doc/5755-5762.pdf>>. Acesso em: 23 set. 2014.

FLORESNZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. São Paulo: Oficina de Texto. 2ª ed. 101 p. 2007.

FOODY, G. Status of land cover classification accuracy assessment. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 1, p. 185-201, 2002.

FRANÇA, H.; RAMOS NETO, M. B.; SETZER, A. O fogo no Parque Nacional das Emas. **MMA, Série Biodiversidade**, v. 27. 2007.

FRIZZO, T. L. M.; BONIZÁRIO, C.; BORGES, M. P.; VASCONCELOS, H. L. Revisão dos Efeitos do Fogo Sobre a Fauna de Formações Savânicas do Brasil. **Oecologia Australis**, v. 15, p. 365-379, 2011.

FUENTES-SANTOS, I.; MAREY-PÉREZ, M. F.; GONZÁLES-MANTEIGA, W. Forest fire spatial pattern analysis in Galicia (NW Spain). **Journal of Environmental Management**, v. 128, p. 30-42, 2013.

GIGLIO, L.; DESCLOITRES, J.; JUSTICE, C. O.; KAUFMAN, Y. J. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p. 273-283, 2003.

GIGLIO, L.; LOBODA, T.; ROY, D. P.; QUAYLE, B.; JUSTICE, C. O. An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 408-420, 2009.

GONTIJO, G. A. B.; PEREIRA, A. A.; OLIVEIRA, E. D. S.; JÚNIOR, F. W. A. Detecção de queimadas e validação de focos de calor utilizando produtos de sensoriamento remoto. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos campos: INPE, 2011. p. 7966-7973. Disponível na biblioteca digital URLib: < <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p1587.pdf>>. Acesso em: 17 outubro de 2014.

GRAÇA, V. P.; GOEDERT, W. J. MARCHETTI, D. A. B.; ROCHA, G. L. **Plano de pesquisa agropecuário para o pantanal de Mato Grosso**. Brasília, EMBRAPA, 1974. 63p.

GRÉGOIRE, J. M.; TANSEY, K.; SILVA, J. M. N. The GBA2000 initiative: developing a global burnt area database from SPOT-VEGETATION imagery. **International Journal Remote Sensing**, v. 24, n. 6, p. 1369 – 1376, 2003.

GRÉGOIRE, J. M.; EVA, H. D.; BELWARD, A. S.; PALUMBO, I.; SIMONETTI, D.; BRINK, A. Effect of land-cover change on Africa's burnt area. **International Journal of Wildland Fire**, v. 22, p. 107-120, 2013.

GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Econometria básica**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. 924 p.

HAINING, R. **Spatial Data Analysis: Theory and practice**. Cambridge University Press. 2003. p. 432.

HOMILTON, S. K.; SIPPEL, S. J.; MELACK, J. M. Inundation patterns in the Pantanal wetland of South America determined from passive microwave remote sensing. **Archiv für Hydrobiologie**, v. 137, n.1, p. 1-23, 1996.

HOUGHTON, J. T.; MEIRA FILHO, L. G.; BRUCE, J.; LEE, H.; CALLANDER, B. A.; HAITES, E.; HARRIS, N.; MASKELL, K. Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change. **Cambridge: Cambridge University Press**. 1995.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/prevfogo>> Acesso em: 14 de setembro de 2013.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/perguntas-frequentes/incendios-florestais>> Acesso em: 4 de novembro de 2014.

IBGE. **Mapa de Biomas do Brasil; primeira aproximação**. Rio de Janeiro: IBGE. 2004.

IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 2ª Edição. Rio de Janeiro: IBGE. 2012.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://7a12.ibge.gov.br/vamos-conhecer-o-brasil/nosso-territorio/biomas>> Acesso em: 20 de Agosto de 2014.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomashtml.shtm>> Acesso em: 19 de Agosto de 2014.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Perfil dos Municípios Brasileiros – Meio Ambiente, 2002. IBGE, Coordenação de Populações e Indicadores Sociais. Rio de Janeiro: IBGE, 394p. 2005.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>> Acesso em: 03 de setembro de 2014.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/Suporte/files/Cameras-LANDSAT57_PT.php> Acesso em: 05 de novembro de 2013.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <<http://www.inpe.br/queimadas/>> Acesso em: 12 de setembro de 2014.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <<http://www.inpe.br/queimadas/faq.php>> Acesso em: 12 de outubro de 2014.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em Recursos Terrestres**. Tradução de J. C. N. Epiphânio. São José dos Campos, SP: Parênteses, 2009. 598p.

JURAS, I. A. G. M. **Biodiversidade perdida: o desmatamento**. In: GANEM, R. S. (org.). Conservação da biodiversidade: legislação e políticas públicas. Brasília: Câmara dos Deputados. Edição Câmara. (Série memória e análises de leis; n. 2). 437 p. 2010.

JUSTICE, C. O.; VERMOTE, E., TOWNSHEND, J. R. G.; DEFRIES, R.; ROY, P. D.; HALL, D.K, SALOMONSON, V. ; PRIVETTE, J.L.; RIGGS, G. ; STRAHLER, A.; LUCHT, W. ; MYNENI, R. B; KNYAZIKHIN, Y. ; RUNNING, S. W.; NEMANI, R. R.; WANG, Z.; HUETE, A. R.; LEEUWEN, W. V.; WOLFE, R. E.; GIGLIO, L.; MULLER, J. P; LEWIS, P.; BARNESLEY, M. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, vol. 36, n. 4, p. 1228-1247, 1998.

JUSTICE, C. O., TOWNSHEND, J. R. G., VERMOTE, E. F., MASUOKA, E., WOLFE, R. E., SALEOUS, N., ROY, D. P., MORISETTE, J. T. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sens. Environment**, v. 83, p. 3–15. 2002a.

JUSTICE, C. O.; GIGLIO, B.; KORONTZI, S.; OWENS, J.; MORISETTE, J.T.; ROY, D.P.; DESCLOITRES, J.; ALLEAUME, S.; PETITCOLIN, F.; KAUFMAN, Y. (2002b). The MODIS fire products. **Remote Sens. Environ.** v. 83, p. 244-262, 2002b.

KAUFFMAN, J. B. CUMMINGS, D. L.; WARD, D. E. Relationships of fire, biomass and nutrient dynamics along a vegetation gradient in the Brazilian Cerrado. **Journal of Ecology**, v. 82, p. 519-531, 1994.

KAUFMAN, Y. J.; KLEIDMAN, R.; KING, M. D.; WARD, D. E. SCAR-B fires in the tropics: Properties and remote sensing from EOS-MODIS. **Journal of Geophysical Research**. v. 103, n. D24, 1998.

KAUFMAN, Y. J.; ICHOKU, C.; GIGLIO, L.; KORONTZI, S.; CHU, D. A.; HAO, W. M.; LI, R. -R.; JUSTICE, C. O. Fire and smoke observed from the Earth Observing System MODIS instrument – products, validation, and operational use. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 8, p. 1765-1781, 2003.

KOUTSIAS, N.; BALATSOS, P.; KALABOKIDIS, K. Fire occurrence zones: kernel density estimation of historical wildfire ignitions at the national level, Greece. **Journal of Maps**, v. 10, n. 4, p. 630-639. 2014.

KUTER, N.; YENILMEZ, F.; KUTER, S. Forest fire risk mapping by kernel density estimation. **Croat. J. for. Eng.** v. 32. 2011a.

KUTER, S.; USUL, N.; KUTER, N. Bandwidth determination for kernel density analysis of wildfire events at forest sub-district scale. **Ecological Modelling**, v. 222, p. 3033-3040. 2011b.

LANDIS, J.R.; KOCH, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159-174. 1977.

LATORRE, M. L.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURU, Y. E.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. Sensor MODIS: características gerais e aplicações. **Espaço & Geografia**, v. 6, n. 1, p. 91-121. 2003.

LIU, W.; WANG, S.; ZHOU, Y.; ZHANG, S. Spatial distribution patterns analysis of historical forest fires in DaXingAn mountains of China. **International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010)**, p. 634-638, 2010.

MATRICARDI, E. A. T.; SKOLE, D. L.; PEDLOWSKI, M. A.; CHOMENTOWSKI, W. Assessment of forest disturbances by selective logging and forest fires in the Brazilian Amazon using Landsat data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 4, p. 1057-1086. 2013.

MATRICARDI, E. A. T. Spatiotemporal dynamics of forest degradation by selective logging and forest fire in the Brazilian Amazon. **A dissertation**. Michigan State University, Department of Geography. 2007.

MENESES, P. R.; SANO, E. E. Classificação pixel a pixel de imagens. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de (Orgs.). **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. 1 ed. Brasília: UnB/CNPq, v.1, 2012.

MIETTINEN, J. Burnt area in insular Southeast Asia using medium resolution satellite imagery. **Dissertationes Forestales** 45. 45p. 2007.

MIRANDA, H. S. NETE, N. W., NEVES, B. M. C. Caracterização das queimadas de Cerrado. In: MIRANDA, H. S. **Efeitos do regime do fogo sobre a estrutura de comunidades de Cerrado: resultados do Projeto Fogo**. IBAMA/MMA, Brasília. 144p. 2010.

MIRANDA, H. S.; SATO, M. N. Efeitos do fogo na vegetação lenhosa do Cerrado. In: SCARIOT, A.; SOUSA-SILVA, J. C.; FELFILI, J. M. (org.). **Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. 2005. 439p.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Biodiversidade do Cerrado e Pantanal: áreas e ações prioritárias para conservação**. Brasília: MMA, 2007.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. PROBIO – Pantanal (2002). Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/mapas/aplic/probio/datadownload.htm>> Acesso em: 03 de agosto de 2014.

MODIS Website. Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>> Acesso em: 12 de setembro de 2013.

MODIS Website. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table> Acesso em: 14 de setembro de 2013.

NUNES, J. R. S. FMA+ - Um novo índice de perigo de incêndios florestais para o estado do Paraná – Brasil. **Tese de Doutorado**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2005.

NUNES DA CUNHA, C.; JUNK, W. J. landscape units of the Pantanal: structure, function, and human use. In: JUNK, W. J. NUNES DA CUNHA, C.; WANTZEN, K. M. (eds): **Ecology, biodiversity and sustainable management of a large neotropical seasonal wetland**. p. 127 – 141. 2009.

OLIVEIRA, A. L. S. Avaliação dos sensores EOS/MODIS e NOAA/AVHRR na detecção e registro de incêndios e queimadas. **Dissertação de mestrado**. Viçosa: UFV, 2006.

PCBAP – Plano de Conservação da Bacia do Alto Paraguai. Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. **Diagnóstico dos meios físicos e bióticos: meio biótico**. Brasília, DF. 400p. 1997a.

PCBAP – Plano de Conservação da Bacia do Alto Paraguai. Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. **Diagnóstico dos meios físicos e bióticos: meio físico**. Brasília, DF. 369p. 1997b.

PEREIRA, A. A.; BARROS, D. A.; JUNIOR, F. W. A.; PEREIRA, J. A. A.; REIS, A. A. Análise da distribuição espacial de áreas queimadas através da função K de Ripley. **Scientia Forestalis**, v. 41. n. 100, p. 445-455, 2013.

PIROMAL, R. A. S.; RIVERA-LOMBARDI, R. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; FORMAGGIO, R.; KRUG, T. Utilização de dados MODIS para a detecção de queimadas na Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 38, n. 1, p. 77-84, 2008.

PIVELLO, V. R. The use of fire in the Cerrado and Amazonian rainforests of Brazil: Past and Present. **Fire Ecology**, v. 7, p. 24-39, 2011.

PODUR, J.; MARTELL, D. L.; CSILLANG, F. Spatial patterns of lightning-caused forest fires in Ontario. **Ecological Modelling**, v. 164, p. 1-20. 2003.

POTT, A. Pastagens nativas. In: EMBRAPA. Centro de Pesquisa Agropecuária do Pantanal (Corumbá, MS). Tecnologias e informações para a pecuária de corte no Pantanal. Corumbá, 1997. p. 7-19.

RIBEIRO, L.; KOPROSKI, L. P.; STOLLE, L.; LINGNAU, C.; SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. Zoneamento de riscos de incêndios florestais para a fazenda experimental do Canguiri, Pinhais (PR). **Revista Floresta**, Curitiba, PR, v. 38, n. 3, p. 561- 572. 2008.

RIPLEY, B. D. Modelling spatial patterns. **Journal of the Royal Statistic Society**, v. 39, n. 2, p.172-212. 1977.

RIVERA-LOMBARDI, R. Estudo da recorrência de queimadas e permanência de cicatrizes do fogo em áreas selecionadas do cerrado brasileiro, utilizando imagens TM/Landsat. **Dissertação de Mestrado**. INPE, São José dos Campos. 159 p. 2003.

RIVEIRA-LOMBARDI, R. J. Estimativa de áreas queimadas com produtos MODIS como subsídio à estimativa de emissão de gases de efeito estufa pela queima de biomassa na Amazônia e Cerrado brasileiros. **Tese de Doutorado**. INPE, São José dos Campos, 188 p. 2009.

RODRIGUES, C. A. G.; CRISPIM, S. M. A.; FILHO, J. A. C. Queimada controlada no Pantanal. (**Documento 35**). Corumbá: Embrapa Pantanal, 2002.

ROY, D. P.; LEWIS, P.; JUSTICE, C. Burned area mapping using multi-temporal moderate spatial resolution data – a bi-directional reflectance model-based expectation approach. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 263 – 286, 2002.

ROY, D. P.; JIN, Y.; LEWIS, P. E.; JUSTICE, C. O. Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data. **Remote Sensing of Environment**, v. 97, p. 137-162, 2005.

ROY, D. P.; BOSCHETTI, L.; JUSTICE, C. O.; JU, J. The collection 5 MODIS burned area product – Global evaluation by comparison with the MODIS active fire product. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 3690-3707, 2008.

ROY, D. P.; BOSCHETTI, L. Southern Africa Validation of the MODIS, L3JRC and GlobCarbon Burned Area Products. **IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v. 47, n.4, p. 1032-1044. 2009.

SALGADO-LABOURIAU, M. L.; FERRAZ-VICENTINI, K. R. Fire in the Cerrado 32,000 years ago. **Current Research in the Pleistocene**, v. 11, p. 85-87, 1994.

SALOMONSON, V. V.; TOLL, D. L. Execution phase (C/D) spectral band characteristics of the EOS moderate resolution imaging spectrometer-nadir (MODISN) facility instrument. **Advances in Space Research**, v. 11, n.3, p. 231-236, 1991.

SALOMONSON, V. V.; BARKER, J. L. EOS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer: phase C/D status and comments on calibration and georeferencing approaches. **15th Annual AAS Guidance and Control Conference**, Paper AAS 92-004, Keystone, CO, Feb. 8-12. 1992.

SANTOS, S. A. Caracterização dos recursos forrageiros nativos da sub-região da Nhecolândia, Pantanal, Mato Grosso do Sul, Brasil. **Tese de Doutorado**. Universidade Estadual Paulista. Campus Botucatu. São Paulo. 2001.

SCHÜLE, W. Landscape and climate in prehistory: Interaction of wildlife, man, and fire. In: GOLDAMMER, J.G. (ed). **Fire in the tropical biota**. New York: Springer-Verlag, Cap. 13, p. 273-318. (Ecological Studies, 84). 1990.

SETZER, A.; MORELLI, F.; RIVERA-LOMBARDI, R. Estimativa quinzenal de áreas queimadas. In: RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; CEBALLOS, J.C. (Coord.). **Sensor MODIS e suas Aplicações Ambientais no Brasil**. 1.ed. São José dos Campos: Editora Parêntese, 425 p. 2007.

SFB. Serviço Florestal Brasileiro. Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/snif/recursos-florestais/os-biomas-e-suas-florestas>> Acesso em: 21 de outubro de 2014.

SILVA, J. S. V; ABDON, M. M; POTT, A. Cobertura vegetal do Bioma Pantanal em 2002. In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 23. Rio de Janeiro, 21 a 24 de outubro de 2007. **Anais...** Rio de Janeiro: SBC, p. 1030-1038, 2007.

SILVA, J. S. V.; ABDON, M. M. Delimitação do Pantanal Brasileiro e suas sub-regiões. Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília, v. 33. Número especial, p. 1703-1711. 1998.

SILVA, T. B., ROCHA, W. J. S. F., ANGELO, M. F. Quantificação e análise espacial dos focos de calor no Parque Nacional da Chapada Diamantina - BA. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos campos: INPE, 2013. p. 6969-6976. Disponível na biblioteca digital URLib: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p1493.pdf>>. Acesso em: 19 out. 2014.

SILVERMAN, B. W. **Density estimation for statistics and data analysis**. London, England: Chapman and Hall. 1986. 175 p.

SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. **Incêndios Florestais: controle, efeitos e uso do fogo**. Curitiba: UFPR, 2007.

STRAHLER, A.; MUCHONEY, D.; BORAK, J.; FRIEDL, M.; GOPAL, S.; LAMBIN, E.; MOODY, A. MODIS Land Cover and Land-Cover Change products algorithm theoretical basis document (A TBD). Version 5.0, Center for Remote Sensing, Department of Geography, Boston University, May, 72 p. 1999.

TANRÉ, D.; DEROO, C.; DUHAUT, P.; HERMAN, M.; MORCRETTE, J. J.; PERBOS, J.; DESCHAMPS, P. Y.; Description of a computer code to Simulate the Satellite Signal in the Solar Spectrum. **International Journal of Remote Sensing**, v. 11, n. 4, p. 659-668. 1990.

TATAGIBA, M. M. A. Estudo da Dinâmica Espacial e Temporal dos Incêndios Florestais no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros. **Dissertação de Mestrado em Engenharia Florestal**, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 92p. 2010.

VERMOTE, E. F. & VERMEULEN, A. Atmospheric correction algorithm: Spectral Reflectances (MOD09). **Version 4.0 Washington: NASA**, 107 p. Apr. 1999.

WHELAN, R. J. **The ecology of fire**. Cambridge University Press, Cambridge. 1995. 346 p.

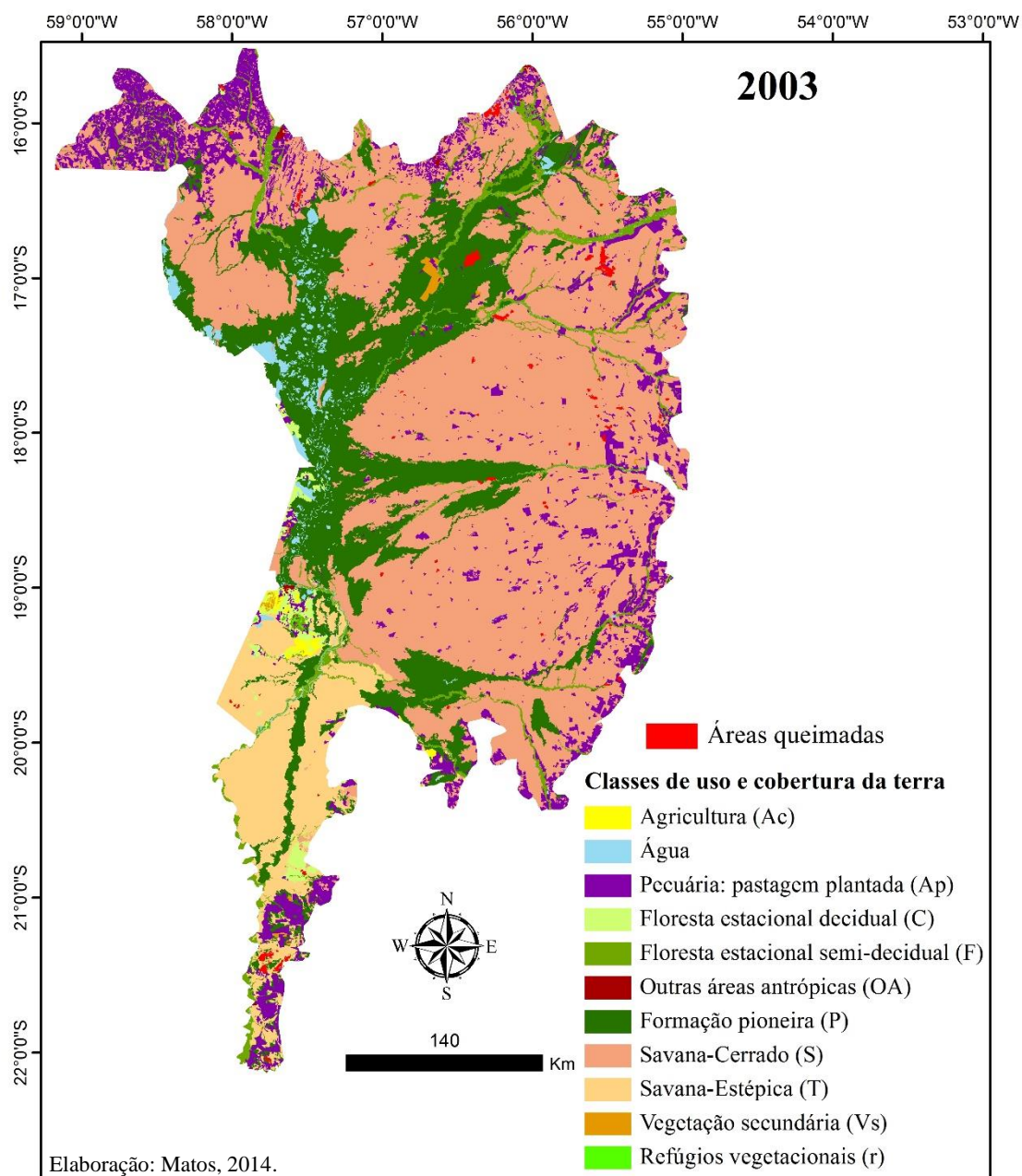
WOOLDRIDGE, J. M. **Introdução à Econometria – uma abordagem moderna**. São Paulo: Cengage Learning, 4 ed. 2010. 701p.

YANG, J.; HE, H. S.; SHIFLEY, S. R.; GUSTAFSON, E. J. Spatial Patterns of Modern Period Human-Caused Fire Occurrence in the Missouri Ozark Highlands. **Forest Science**, v. 53, n. 1, p. 1-15. 2006.

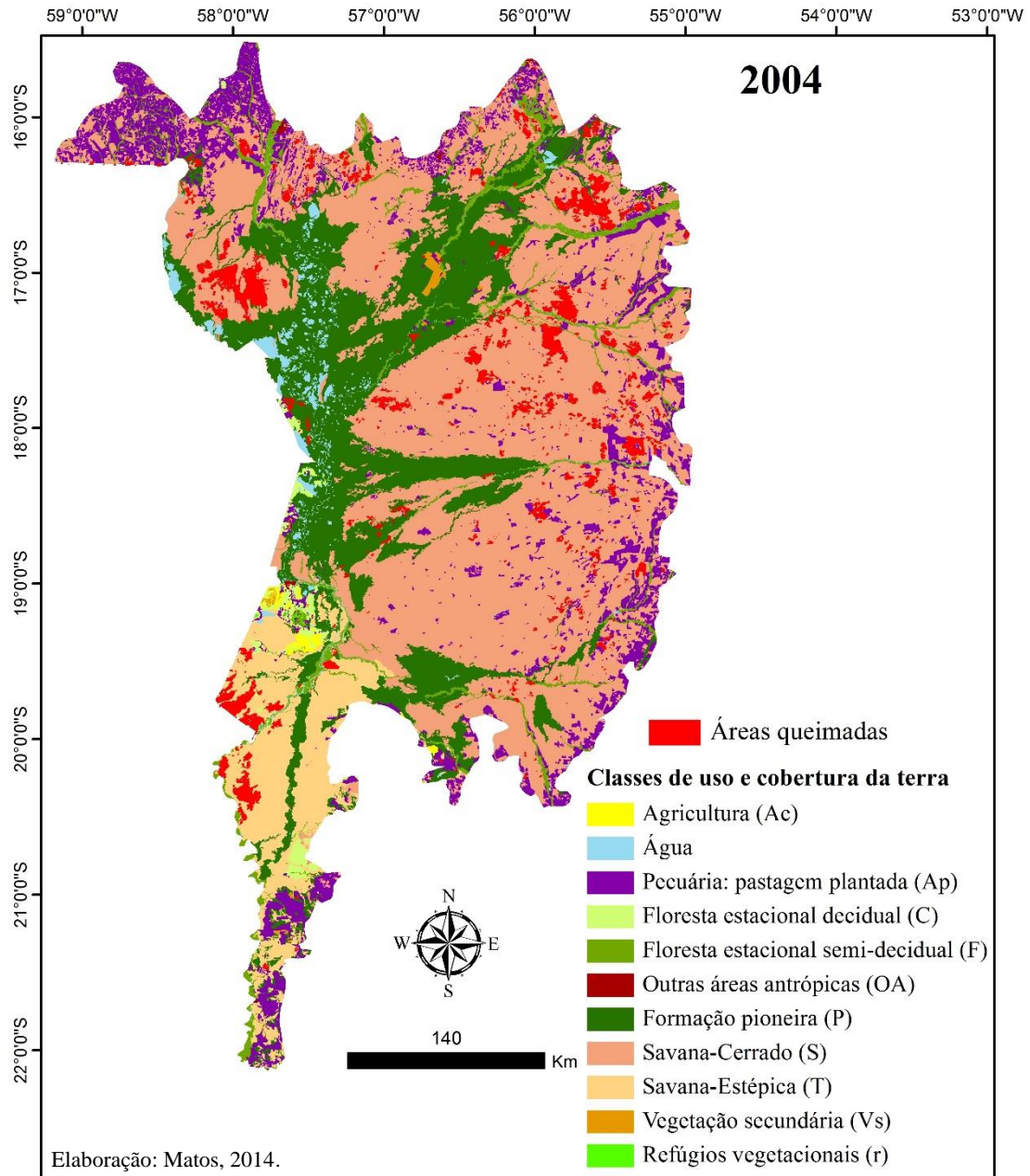
ZARCO-TEJADA, P. J.; RUEDA, C. A.; USTIN, S. L. Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. **Remote Sensing of Environment**, v. 85, n. 1, p. 109-124. 2003.

ZHAN, X.; SOHLBERG, R. A.; TOWNSHEND, J. R. G.; DIMICELI, C.; CARROLL, M. L.; EASTMAN, J. C.; HANSEN, M. C.; DEFRIES, R. S. Detection of land cover changes using MODIS 250 m data. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 336-350. 2002.

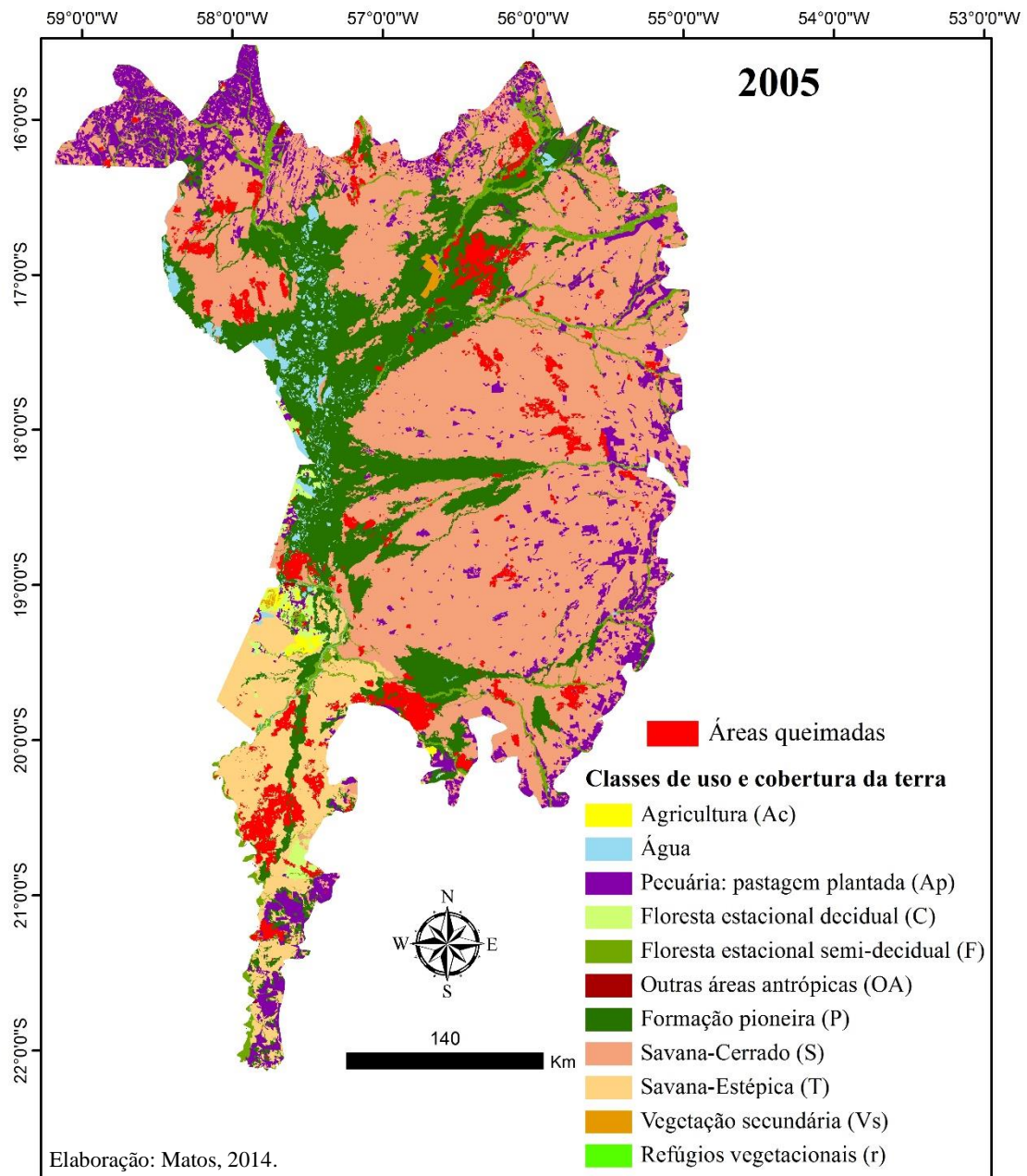
APÊNDICE A



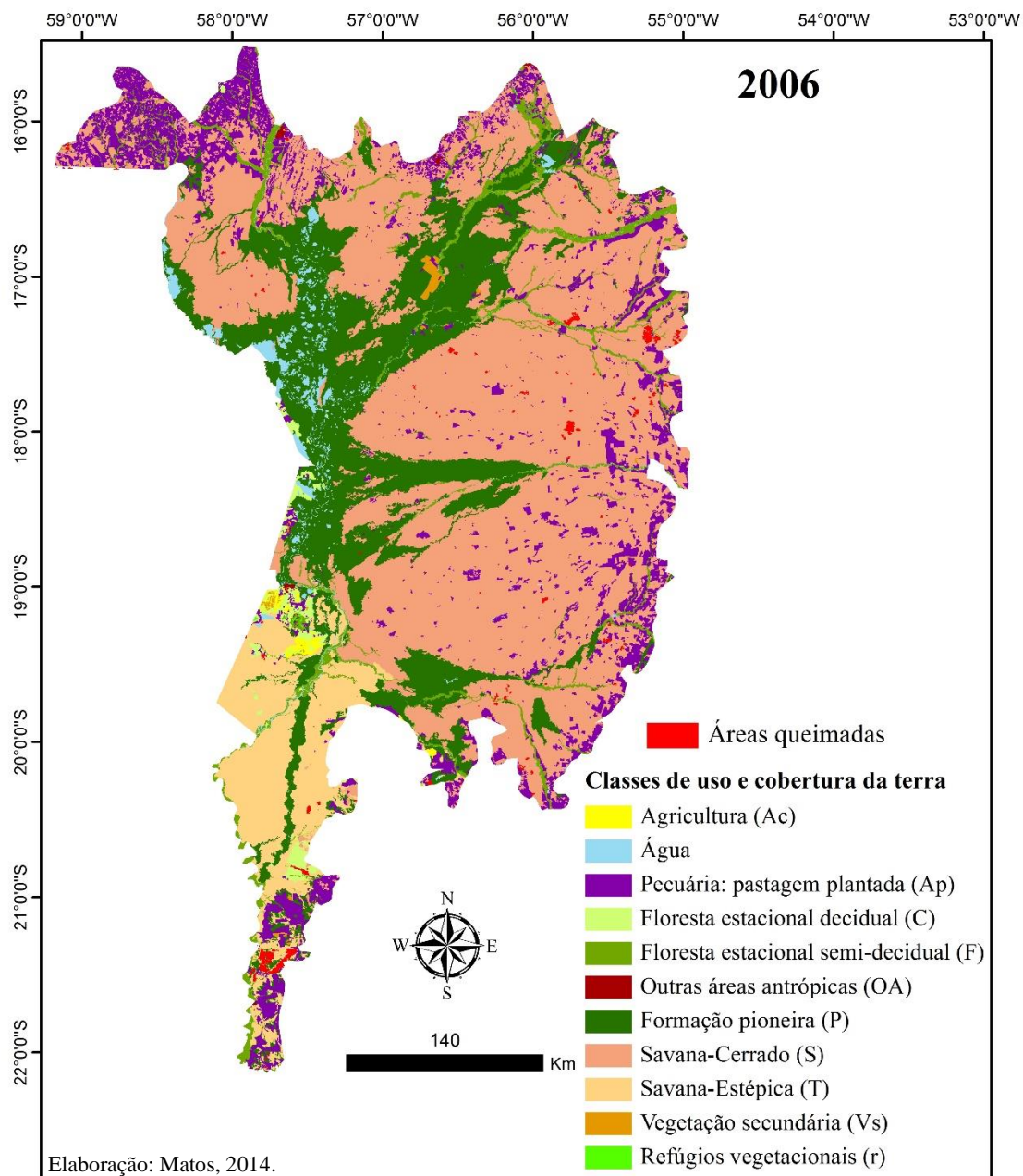
Fonte: Uso da terra: PROBIO – Pantanal (MMA, 2002); Áreas queimadas: Matos, 2014.



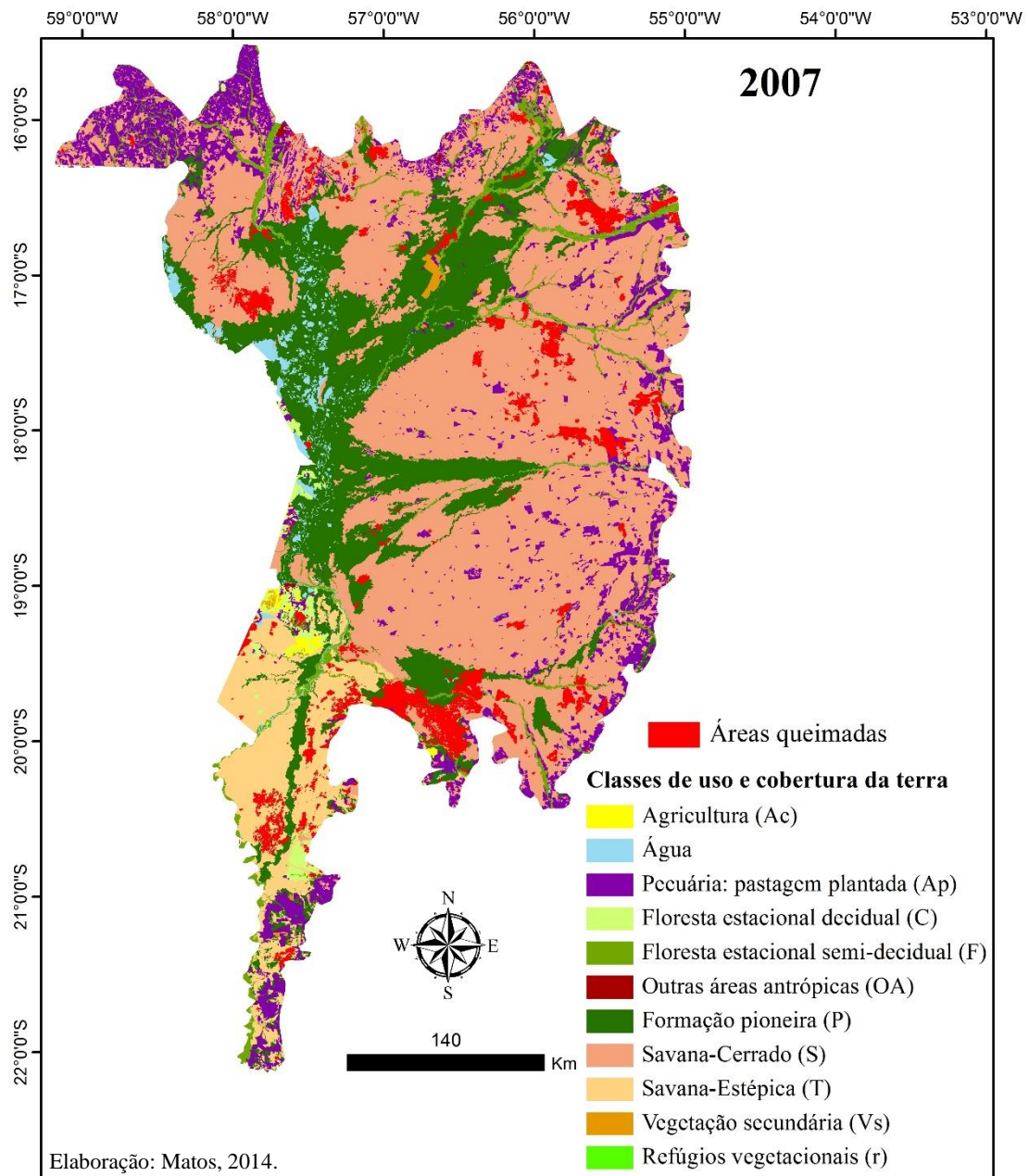
Fonte: Uso da terra: PROBIO – Pantanal (MMA, 2002); Áreas queimadas: Matos, 2014.



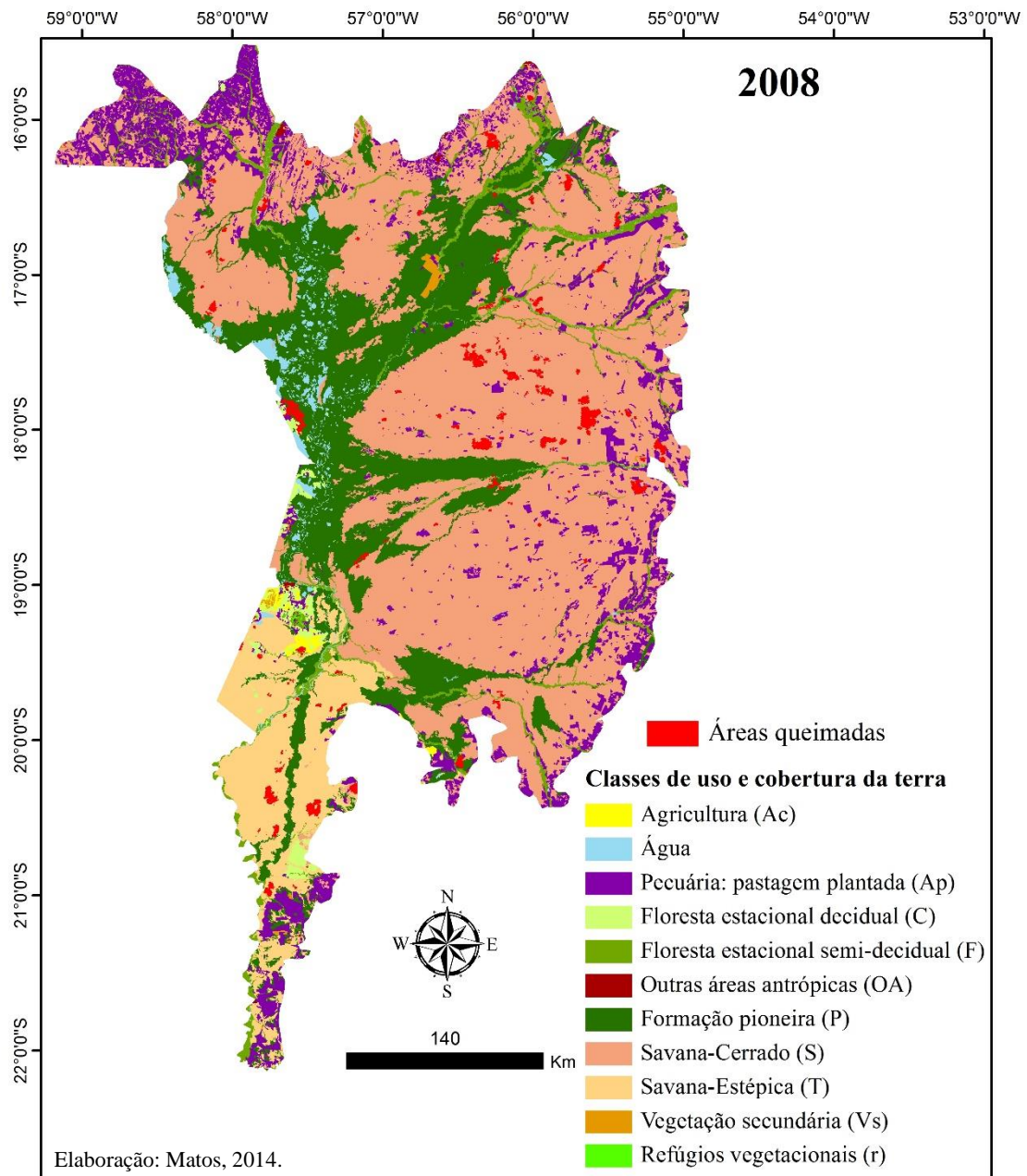
Fonte: Uso da terra: PROBIO – Pantanal (MMA, 2002); Áreas queimadas: Matos, 2014.



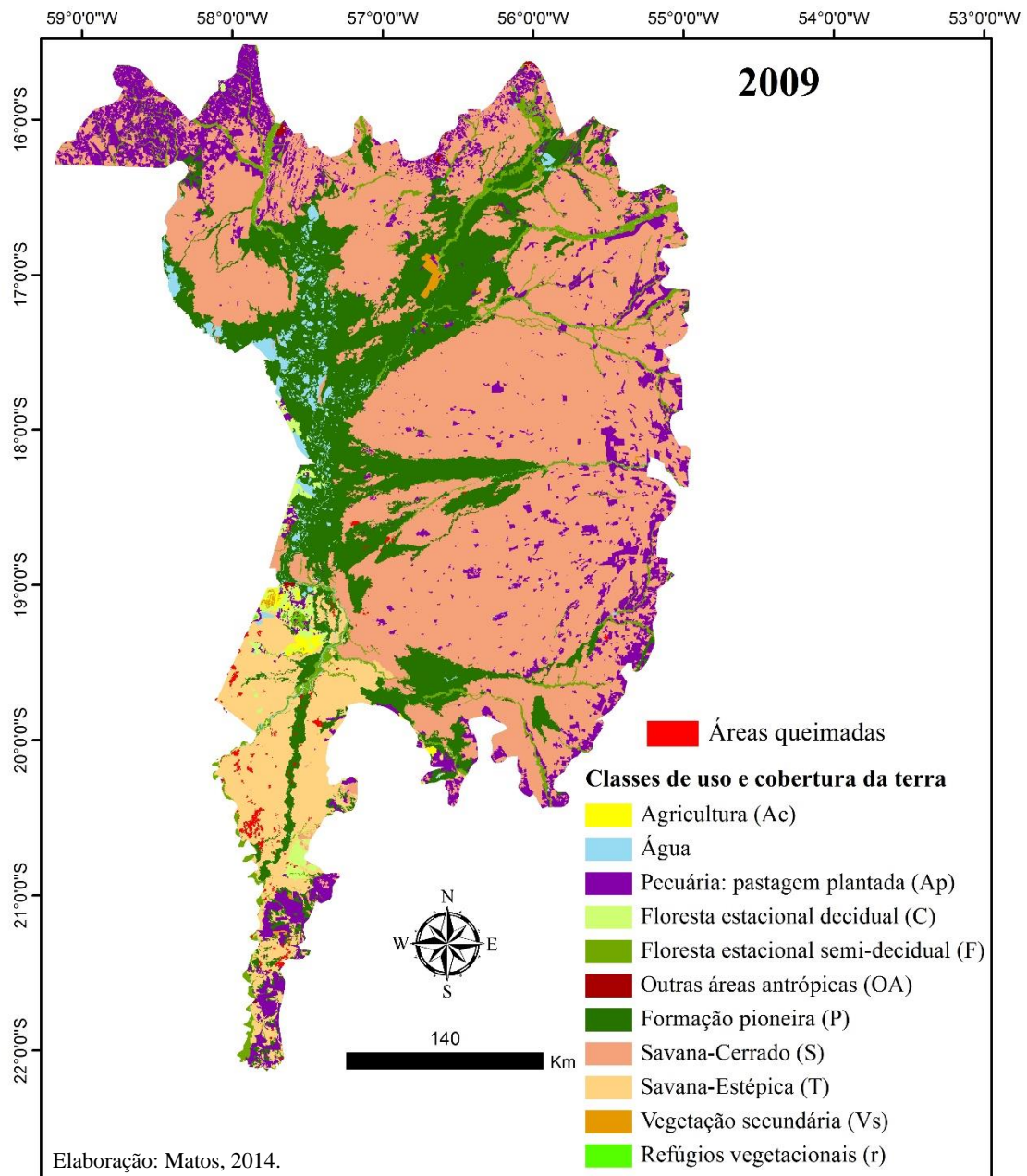
Fonte: Uso da terra: PROBIO – Pantanal (MMA, 2002); Áreas queimadas: Matos, 2014.



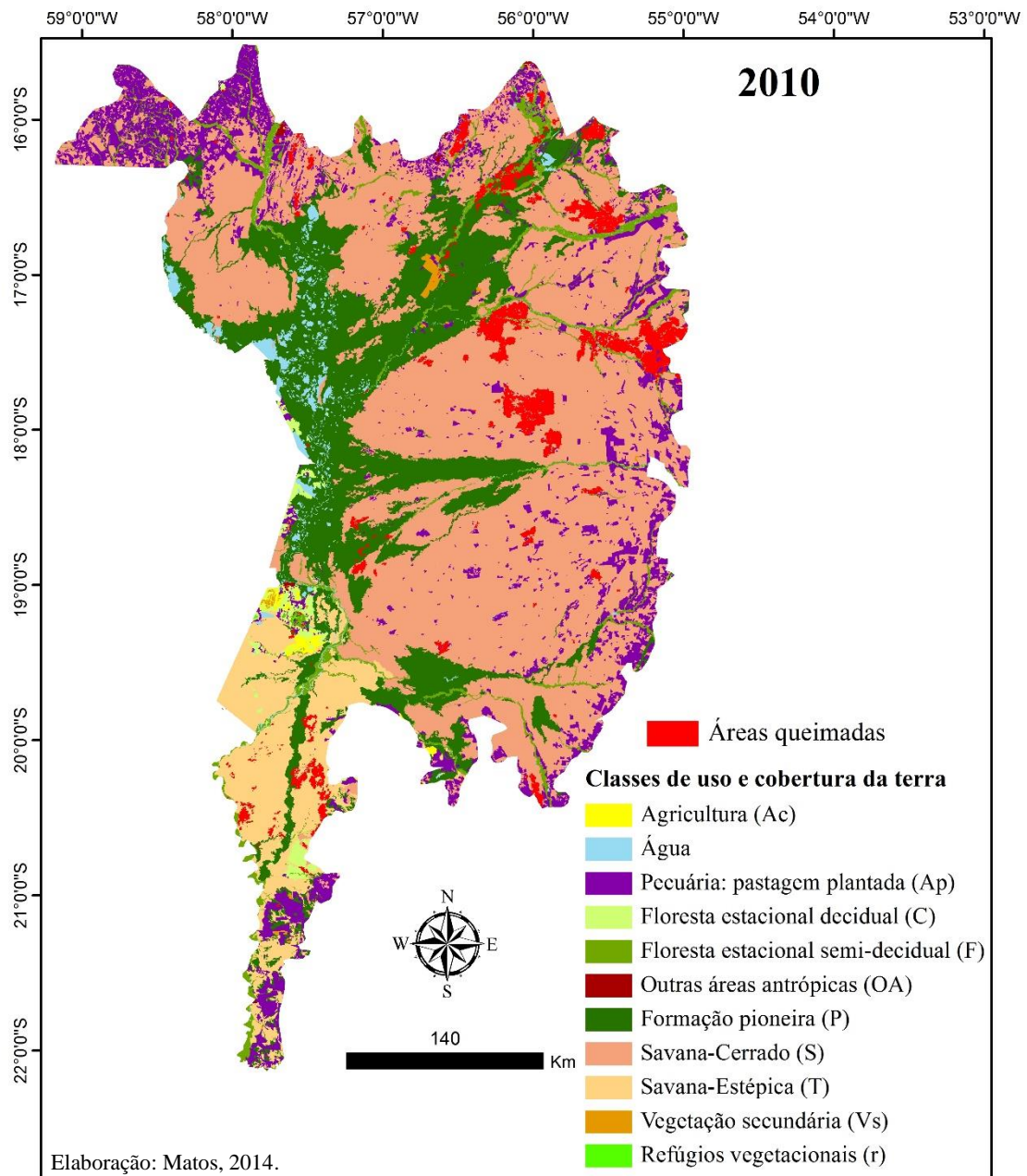
Fonte: Uso da terra: PROBIO – Pantanal (MMA, 2002); Áreas queimadas: Matos, 2014.



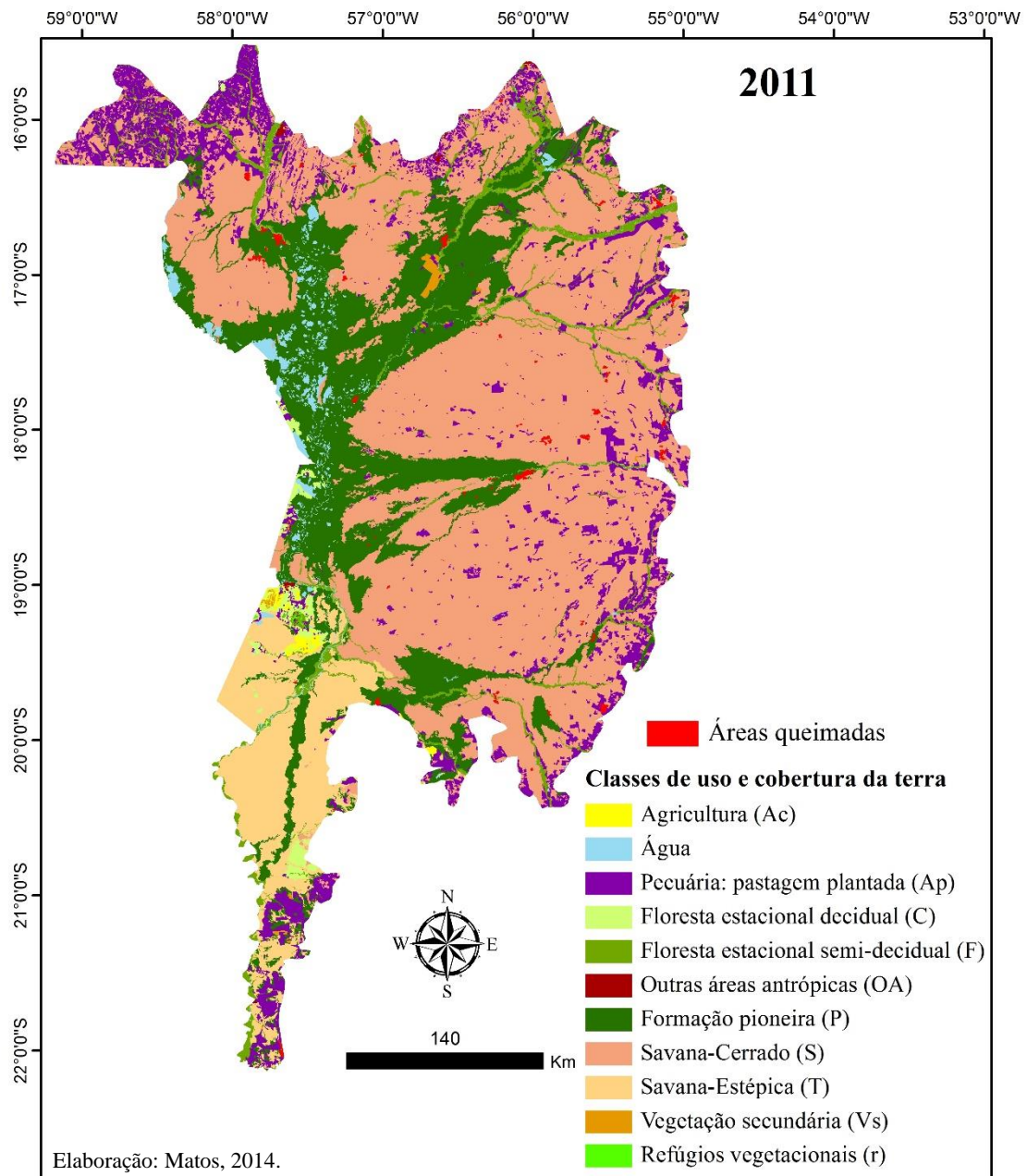
Fonte: Uso da terra: PROBIO – Pantanal (MMA, 2002); Áreas queimadas: Matos, 2014.



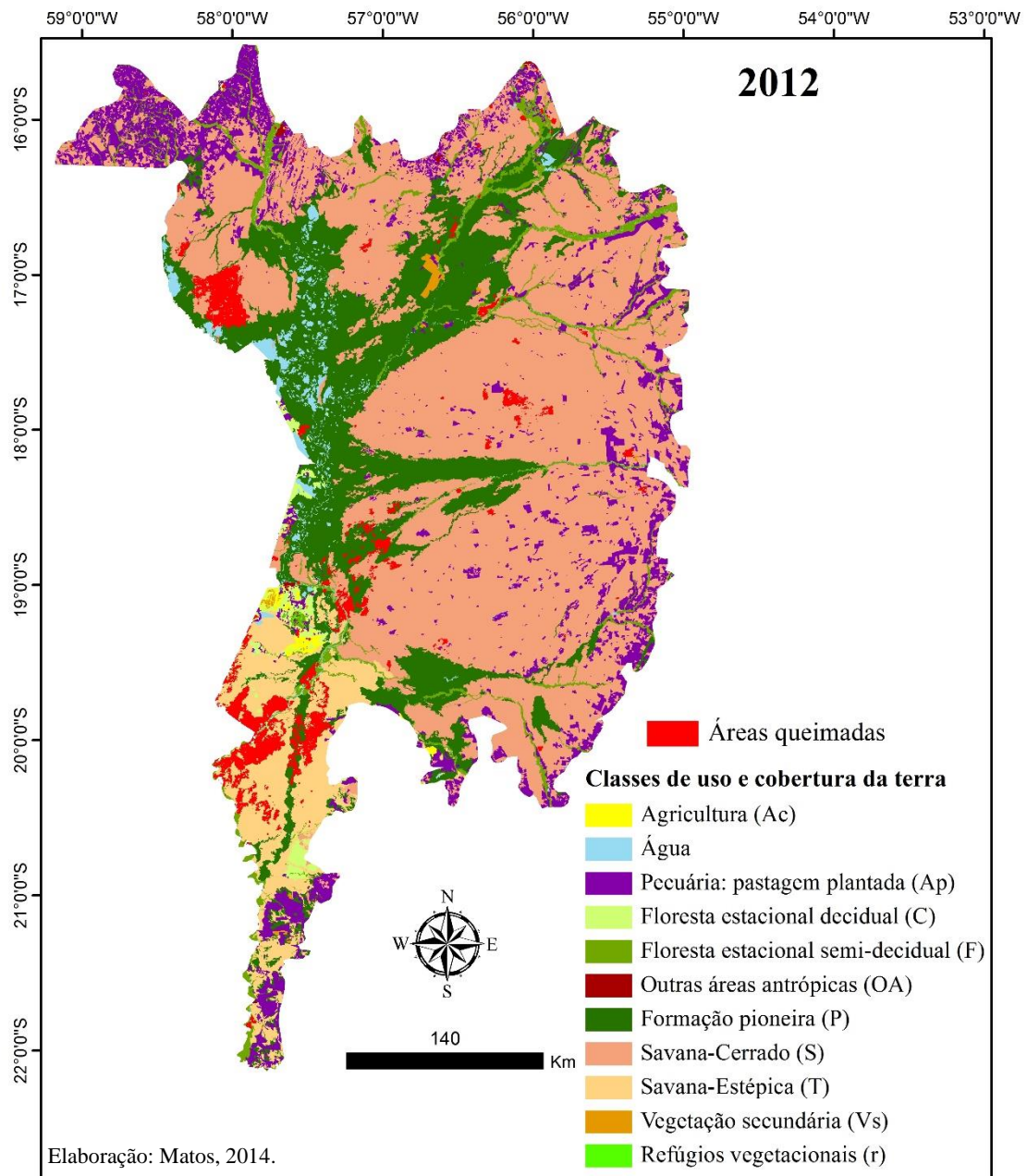
Fonte: Uso da terra: PROBIO – Pantanal (MMA, 2002); Áreas queimadas: Matos, 2014.



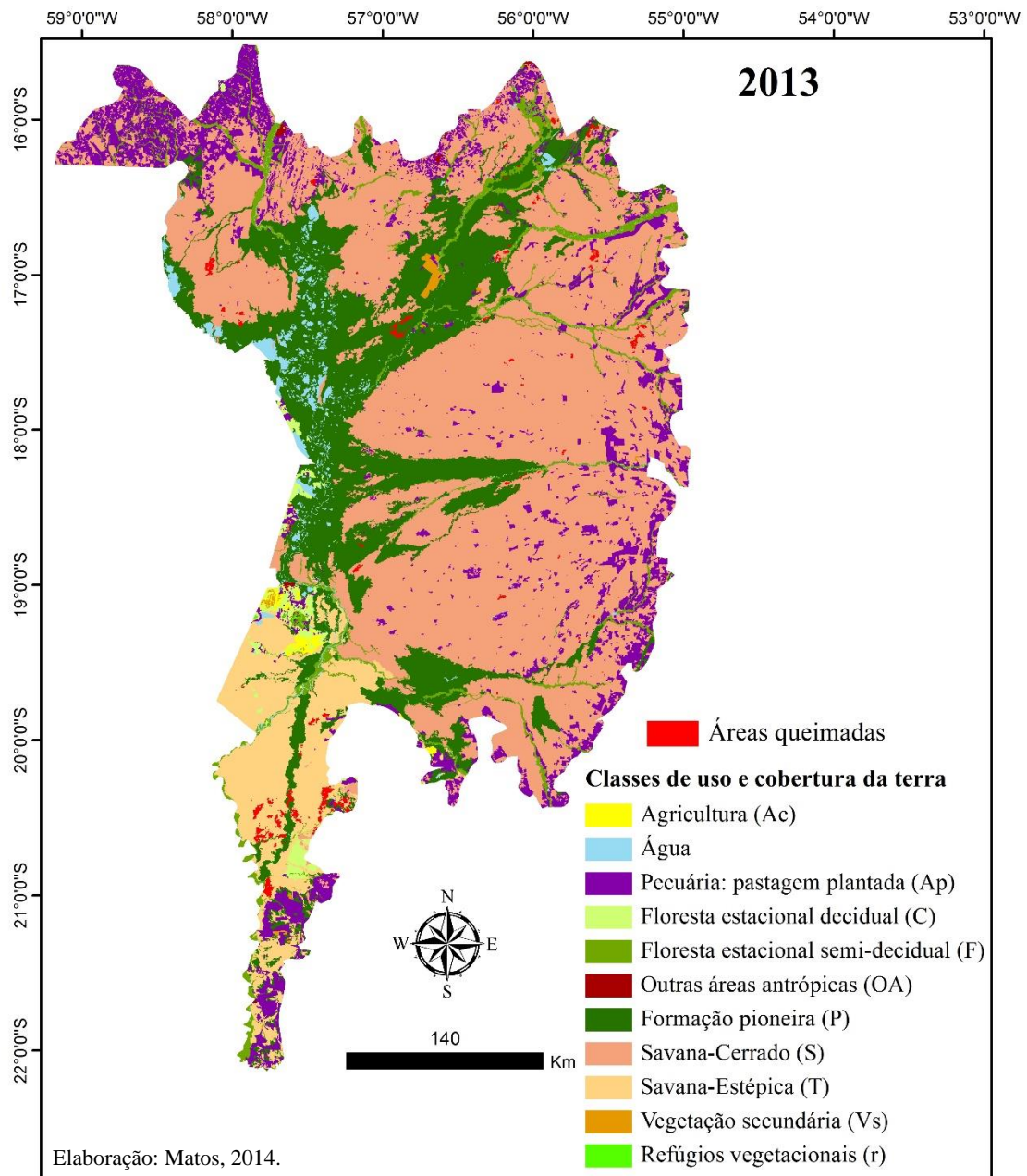
Fonte: Uso da terra: PROBIO – Pantanal (MMA, 2002); Áreas queimadas: Matos, 2014.



Fonte: Uso da terra: PROBIO – Pantanal (MMA, 2002); Áreas queimadas: Matos, 2014.



Fonte: Uso da terra: PROBIO – Pantanal (MMA, 2002); Áreas queimadas: Matos, 2014.



Fonte: Uso da terra: PROBIO – Pantanal (MMA, 2002); Áreas queimadas: Matos, 2014.